Į EGZAMINĄ – BE BAIMĖS!

Albinas Ivanauskas
Stasys Jurėnas

Fizika

Prisiminkime ir pakartokime



Į EGZAMINĄ – BE BAIMĖS!

Albinas Ivanauskas
Stasys Jurėnas

Fizika



Prisiminkime ir pakartokime



ŠVIESA KAUNAS

UDK 53(075.3)
Iv12

Pirmasis leidimas 2006

Ivanauskas, Albinas
Iv12 Fizika: prisiminkime ir pakartokime / Albinas Ivanauskas, Stasys Jurėnas. – Kaunas: Šviesa, 2006. – 158 p.: iliustr., brėž., lent. – (Į egzaminą – be baimės!)
Dalyk. r-klė: p. 159–164. – Priedai: p. 165–173. – Bibliogr., p. 174.
ISBN 5-430-04377-X
Leidinys skiriamas abiturientams, kurie savarankiškai rengiasi tiek valstybiniam, tiek mokykliniam fizikos egzaminui. Taip pat juo gali naudotis visi norintys susipažinti su mokykliniu fizikos kursu ar jį pakartoti.
UDK 53(075.3)

ISBN 5-430-04377-X

TURINYS

Mielieji moksleiviai,

Nuo 2000 metų Lietuvos vidurinių mokyklų ir gimnazijų abiturientai laiko valstybinį ir mokyklinį fizikos egzaminą, kurio turinį detaliai apibrėžia „Fizikos brandos egzaminų programa“. Per pastarąjį laikotarpį yra išleista įvairiausių fizikos testų ir kompleksinių uždavinių knygų. Tačiau nuosekliai rengtis egzaminui vis dar sunku, nes egzaminų programa reikalauja mokyklinio fizikos kurso apibendrinimo, o tokio turinio leidinių beveik nėra.

Mūsų nuomone, geras fizikinio pasaulio suvokimas, jį aprašančios teorijos išmanymas yra nepaprastai svarbu norint sėkmingai atlikti įvairias užduotis. Manome, kad šis leidinys bent iš dalies padės tinkamai pasirengti egzaminui. Sėkmės.

Autoriai

Įvadas

Fizikos mokslo nagrinėjimo objektas yra gamta kaip materija. Tai visa, kas egzistuoja mūsų pasaulyje. Materija skirstoma į dvi rūšis: medžiagą ir lauką.

Iš medžiagos sudaryti visi kūnai. Jie gali būti kieti, skysti arba dujiniai. Egzistuoja ir ketvirta medžiagos būsena – plazma (iš dalies arba visiškai jonizuotos dujos). Bet kokios būsenos medžiaga susideda iš dalelių (molekulių, atomų, jonų). Tai bendras medžiagos, kaip materijos, požymis.

Taip pat gamtoje yra objektų, nepasižyminčių medžiagos savybėmis. Tai šviesa, šiluminiai (infraraudonieji), ultravioletiniai, rentgeno, gama spinduliai, radijo bangos. Įelektrintus kūnus supa elektrinis, o magnetus, elektromagnetus, Žemę ir kai kuriuos dangaus kūnus – magnetinis laukas. Šie laukai – tipiški minėtos materijos pavyzdžiai.

Nė akimirkai gamta neišlieka visiškai tokia pat, ji keičiasi. Įvairius objektų (jų savybių, formų, būsenų, padėties) kitimus vadiname fizikiniais reiškiniais. Stebėdamas vykstančius reiškinius, žmogus atkreipė dėmesį, kad esant tokioms pat sąlygoms jie pasikartoja, t. y. vyksta dėsningai. Iš pradžių pasyviai sekdama, vėliau atlikdama eksperimentus, žmonija sukaupė žinias apie įvairiems reiškiniams būdingus dėsningumus ir jų pagrindu sukūrė tų reiškinių teorijas, t. y. mokslą. Kadangi gamta yra labai sudėtinga ir didžiulė, neįmanoma įvertinti absoliučiai visų objektų įtakos stebimam reiškiniui. Todėl sukurta teorija tėra tik realaus pasaulio modelis. Ilgainiui ne viena teorija buvo pakeista kita, tikslesne. Naujoji teorija nepaneigdavo senosios, bet atskleisdavo jos netikslumus, parodydavo taikymo ribas.

1. Matematinė fizikos kalba

Įvairių reiškinių dėsningumai gali būti perteikiami šiais būdais: tekstu, formulėmis, grafiškai. Paprasčiausių reiškinių dėsningumai pasakomi šnekamąja kalba – sakiniais. Sudėtingų reiškinių dėsningumus kur kas patogiau pateikti matematine kalba – formulėmis.

Formulę sudaro skaičiai, veiksmų ženklai ir raidės, kuriomis žymimi įvairūs fizikiniai dydžiai – kiekybinės objektų savybių bei reiškinių požymių charakteristikos. Vykstant reiškiniams keičiasi juose dalyvaujančių objektų savybės, reiškinių požymiai, todėl atitinkamai kinta juos žymintys fizikiniai dydžiai. Reiškinių dėsningumus atskleidžia matematinės formulės – funkcijos. Jos pasako, kaip vienų dydžių (funkcijų) kitimas priklauso nuo kitų dydžių (argumentų) kitimo. Dažnai reiškiniams būdingi dėsningumai parodomi nubraižant tų funkcijų grafikus.

Nagrinėjamas reiškinys ir jame dalyvaujantys objektai yra apibūdinami keletu fizikinių dydžių. Vykstant reiškiniui vieni jų kinta, kiti išlieka pastovūs. Laisvai kintantys dydžiai matematikoje vadinami argumentais, o tie, kurių kitimas priklauso nuo argumentų kitimo – funkcijomis. Nekintantys dydžiai vadinami konstantomis.

Dažnai naudojamas dydis, kuris pasako, kaip sparčiai kinta nagrinėjamas dydis keičiantis argumentui. Matematikoje toks dydis vadinamas nagrinėjamo dydžio pirmąja išvestine argumento atžvilgiu. Jeigu naujasis dydis taip pat kinta (yra nauja funkcija), gali būti įvedamas dar vienas dydis, apibūdinantis naujojo kitimą. Matematikoje jis vadinamas naujojo dydžio pirmąja išvestine arba pirmojo dydžio antrąja išvestine. Jeigu reiškinio dėsningumas pavaizduotas fizikinio dydžio priklausomybės nuo argumento grafiku, apie jo išvestinę (kitimo greitį) galima spręsti iš grafiko statumo. Jeigu pavaizduotas išvestinės (naujojo dydžio) priklausomybės grafikas, tuomet iš jo su argumento ašimi ribojamo ploto priklausomybės nuo argumento galima spręsti apie pirminės funkcijos (dydžio, kurio išvestinės grafikas pavaizduotas) priklausomybę nuo argumento.

2. Fizikiniai dydžiai ir jų vienetai

Visi fizikiniai dydžiai skirstomi į dvi rūšis: skaliarus ir vektorius. Skaliariniais vadiname dydžius, kurie pasakomi skaitine verte (skaičiumi) ir matavimo vienetais. Vektoriai – dydžiai, turintys kryptį. Vektorinio dydžio skaitinė vertė su matavimo vienetu vadinama vektoriaus moduliu. Vektoriaus modulio reikšmės negali būti neigiamos.

Su skaliariniais dydžiais atliekami įprasti matematiniai veiksmai. Nepamirškite, kad veiksmai atliekami ne tik su skaičiais, bet ir su matavimo vienetais.

Su vektoriais pirmiausia atliekame geometrinius veiksmus. Kiekvienas vektorinis dydis vaizduojamas kryptine atkarpa (rodykle).

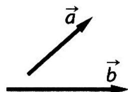
Jos ilgis atitinka vektoriaus modulį pasirinktu masteliu. Užrašydami vektorinį dydį, jo kryptį nurodome kampu, kurį vektorius sudaro su pasirinkta (arba jai statmena) ašimi. Du vektoriai lygūs tik tada, kai jie pavaizduoti vienodu masteliu, yra vienodo ilgio ir tos pačios krypties, t. y. ne tik jų moduliai lygūs, bet ir kryptys vienodos.

Mokykliniame kurse su vektoriais atliekami šie veiksmai: sudėtis, vektoriaus skaidymas į dedamuosius vektorius, atimtis, vektoriaus daugyba iš skaliaro, skaliarinė vektorių daugyba.

Vektorius $\vec{a}$ ir $\vec{b}$ (1 pav.) sudėti galima dviem būdais: trikampio ir lygiagretainio.

Pirmasis būdas: prie vektoriaus $\vec{a}$ galo dedame $\vec{b}$ pradžią ir, nekeisdami nei ilgio, nei krypties, jį atidedame. Sujungus $\vec{a}$ pradžią su $\vec{b}$ galu gautas vektorius yra $\vec{a}$ ir $\vec{b}$ sumos vektorius $\vec{c}$: $\vec{a}+\vec{b}=\vec{c}$ (2 pav.). Sudėdami daugiau vektorių, juos nuosekliai atidedame vieną paskui kitą. Vektorius, jungiantis pirmojo vektoriaus pradžią su paskutiniojo galu, yra jų sumos vektorius: $\vec{a}+\vec{b}+\vec{c}+\vec{d}+\vec{e}=\vec{f}$ (3 pav.).

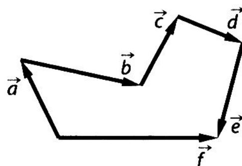
Antrasis būdas: vektorius $\vec{a}$ ir $\vec{b}$ atidedame iš vieno taško; nekeičiame nei jų ilgių, nei krypčių. Laikydami, kad jie sudaro dvi lygiagretainio kraštines, nubrėžiame lygiagretainį. Iš vektorių pradžios taško išvesta įstrižainė su rodykle yra $\vec{a}$ ir $\vec{b}$ sumos vektorius $\vec{c}$ (4 pav.).



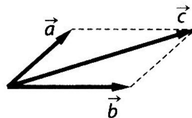
1 pav.



2 pav.

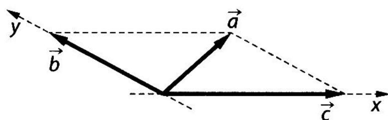


3 pav.



4 pav.

Sumos vektorius dažnai vadinamas atstojamuoju. Kai kada tenka žinomą vektorių išreikšti nurodytų krypčių vektorių suma. Šis veiksmas vadinamas **vektoriaus skaidymu** į dedamuosius vektorius. Dažniausiai vektorius skaidomas į du, kartais į tris vektorius. Norėdami išskaidyti $\vec{a}$ į du vektorius, iš jo pradžios išvedame dvi (x ir y) ašis nurodytomis kryptimis. Iš $\vec{a}$ galo brėžiame tieses, lygiagrečias su x ir y ašimis (5 pav.). Ašyse gautos kryptinės atkarpos ir yra dedamieji vektoriai $\vec{b}$ ir $\vec{c}$. Taigi $\vec{a}=\vec{b}+\vec{c}$.

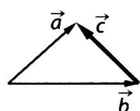


5 pav.

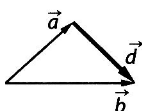
Iš $\vec{a}$ **atimdami** $\vec{b}$, abu vektorius atidedame iš vieno taško. Jų galus jungiantis nuo atėminio į turinį (nuo $\vec{b}$ galo į $\vec{a}$ galą) nukreiptas vektorius yra $\vec{a}$ ir $\vec{b}$ skirtumo vektorius $\vec{c}$: $\vec{a}-\vec{b}=\vec{c}$ (6 pav.). Kai iš $\vec{b}$ atimame $\vec{a}$, gauname to paties modulio kaip pirmuoju atveju, tik priešingos krypties vektorių: $\vec{b}-\vec{a}=\vec{d}$ (7 pav.). Vadinasi, $\vec{d}=-\vec{c}$. Atlikdami vektorių sudėtį arba atimtį, juos turime pavaizduoti tuo pačiu masteliu.

Daugindami vektorių $\vec{a}$ iš skaliarinio dydžio k, gauname tos pačios krypties vektorių, jei $k > 0$, ir priešingos krypties vektorių, jei $k < 0$. Naujo vektoriaus modulis lygus žinomo vektoriaus modulio a ir skaliaro $|k|$ sandaugai. Pavyzdžiui, $\vec{b}=k_1\vec{a}$; čia $k_1 = 1{,}5$ ($b = ka$, $b = 1{,}5a$) ir $\vec{c}=k_2\vec{a}$; čia $k_2=-2$ $(c=|k_2|a, c=2a)$ arba $\vec{b}=1{,}5\vec{a}$ ir $\vec{c}=$ $=-2\vec{a}$ (8 pav.). Kai skaliaras k yra nedimensinis dydis (skaičius), vektoriai $\vec{a}$, $\vec{b}$ ir $\vec{c}$ vaizduojami tuo pačiu masteliu. Jei k turi matavimo vienetus, skirtingi vektoriai vaizduojami kiekvienas savo masteliu.

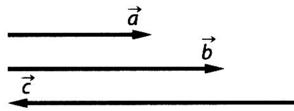
Dviejų vektorių sandauga gali būti skaliarinis dydis. Jis lygus $\vec{a}$ ir $\vec{b}$ modulių sandaugai, padaugintai iš kampo tarp vektorių kosinuso reikšmės. Tokia sandauga vadinama **skaliarine vektorių sandauga:** $c=\vec{a}\cdot\vec{b}=a\cdot b\cos\alpha$; čia $c=(\widehat{\vec{a}\cdot\vec{b}})$ (9 pav.). (Be skaliarinės, yra ir vektorinė vektorių sandauga.)



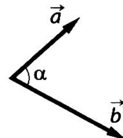
6 pav.



7 pav.



8 pav.

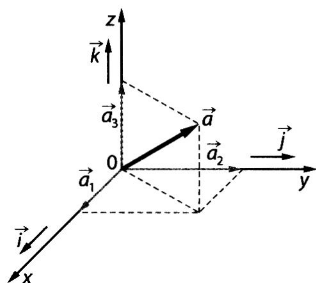


9 pav.

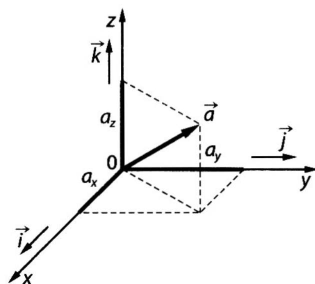
Norint rasti vektorinį dydį reikia apskaičiuoti jo modulį ir kryptį nurodantį kampą. Mūsų pasaulis vadinamas trimačiu, nes erdvėje galima nubrėžti tik tris viena kitai statmenas kryptis. Šiomis kryptimis nubrėžti vektoriai laikomi nepriklausomais, nes tarpusavyje statmenų vektorių negalima išreikšti vienų kitais atliekant skaidymą. Taigi bet koks erdvėje esantis vektorius gali būti išskaidytas tik į tris nepriklausomus vektorius. Dedamieji vektoriai gali būti pakeisti skaliarinių dydžių ir vienetinių vektorių sandauga. Vektorių $\vec{a}$ galima išreikšti taip:

$$\vec{a}=\vec{a}_1+\vec{a}_2+\vec{a}_3 \text{ arba } \vec{a}=a_x\cdot\vec{i}+a_y\cdot\vec{j}+a_z\cdot\vec{k};$$

čia $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ – vienetiniai nepriklausomi vektoriai (jų moduliai lygūs vienetui) (10 pav.). O a_x, a_y, a_z – skaliariniai dydžiai, iš kurių padauginę vienetinius vektorius gauname tarpusavyje nepriklausomus dedamuosius vektorius $\vec{a}_1$, $\vec{a}_2$, $\vec{a}_3$, sudarančius žinomą vektorių $\vec{a}$; a_x, a_y, a_z – tai vektoriaus $\vec{a}$ projekcijos x, y, z ašyse (11 pav.). Jos yra teigiamos, jei dedamųjų vektorių kryptys sutampa su vienetinių vektorių (ašių) kryptimis, ir neigiamos – jei priešingos ašių kryptims.



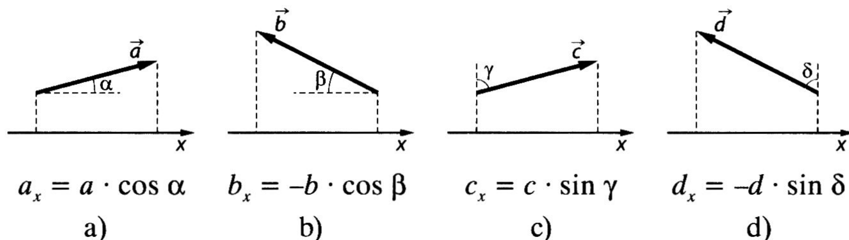
10 pav.



11 pav.

Plokštumoje esančius vektorius galima išskaidyti tik į du nepriklausomus vektorius. Todėl tie vektoriai išreiškiami tik dviem projekcijomis. Kadangi pavaizduoto vektoriaus ilgis atitinka jo modulį, projekcijas galima rasti iš kampo sinuso arba kosinuso apibrėžimų.

Žinodami vektoriaus modulį ir jo kryptį nurodantį kampą, galime rasti vektoriaus projekcijas (žr. 12 pav.). Atsižvelgiant į projekcijos ženklą, iš sinuso ir kosinuso apibrėžimų matyti, kad:



$a_x = a \cdot \cos\alpha$ a)

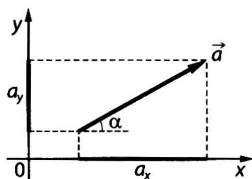
$b_x = -b \cdot \cos\beta$ b)

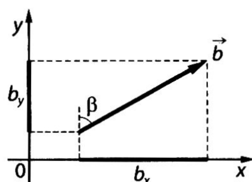
$c_x = c \cdot \sin\gamma$ c)

$d_x = -d \cdot \sin\delta$ d)

12 pav.

Jeigu žinomos vektoriaus projekcijos, galima apskaičiuoti jo modulį (remiantis Pitagoro teorema) ir kryptį nurodantį kampą (žr. 13 pav.):





a) $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$ ir

$\cos\alpha = \dfrac{a_x}{a}$ arba

$\sin\alpha = \dfrac{a_x}{a}$, arba

$\operatorname{tg}\alpha = \dfrac{a_y}{a_x}$.

b) $b = \sqrt{b_x^2 + b_y^2}$ ir

$\cos\beta = \dfrac{b_y}{b}$ arba

$\sin\beta = \dfrac{b_x}{b}$, arba

$\operatorname{tg}\beta = \dfrac{b_x}{b_y}$.

13 pav.

Bet kokį erdvės vektorių $\vec{a}$ galima išskaidyti į tris nepriklausomus dedamuosius vektorius (žr. 10 ir 11 pav.). Žinant visas tris jo projekcijas, modulis randamas pagal šią formulę: $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$. Vektoriaus $\vec{a}$ ir $0x$ ašies sudaromas kampas α apskaičiuojamas taip: kai $a_x > 0$, $\cos\alpha = \dfrac{a_x}{a}$; kai $a_x < 0$, $\cos\alpha = \dfrac{|a_x|}{a}$; antruoju atveju α yra vektoriaus $\vec{a}$ sudaromas su priešinga x ašiai kryptimi kampas. Analogiškai $\cos\beta = \dfrac{a_y}{a}$ ir $\cos\gamma = \dfrac{a_z}{a}$; čia β ir γ – vektoriaus $\vec{a}$ sudaromi kampai su y ir z ašimis.

Apskaičiuodami ieškomo vektorinio dydžio modulį, vektorinę lygtį keičiame analogiškomis projekcijų lygtimis ir apskaičiuojame ieškomo vektoriaus projekcijas, o paskui – jo modulį ir kryptį nurodančius kampus. Jeigu vektoriai nukreipti viena tiese, racionaliausia ašį, į kurią projektuosime vektorius, pasirinkti tiesės kryptimi (turėsime tik vieną projekcijų lygtį). Jeigu vektoriai plokštumoje, vektorinę lygybę racionaliausia keisti dviem projekcijų lygybėmis.

Kiekvieno dydžio tam tikra vertė vadinama to dydžio vienetu. Daugelis šalių naudojasi vieninga tarptautine vienetų sistema (SI). Šioje vienetų sistemoje septynių dydžių vienetai vadinami baziniais: laiko – sekundė (s), ilgio – metras (m), masės – kilogramas (kg), medžiagos kiekio – molis (mol), temperatūros – kelvinas (K), elektros srovės stiprio – amperas (A) ir šviesos stiprio – kandela (cd).

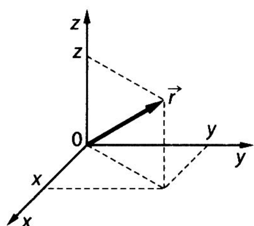
Jie apibrėžiami pagal tam tikrus susitarimus. Yra du papildomi vienetai: plokštumos kampo – radianas (rad) ir erdvinio kampo – steradianas (sr). Kitų dydžių vienetai išreiškiami baziniais vienetais. Yra keli dydžiai, neturintys matavimo vienetų; jie nurodomi tik skaičiumi.



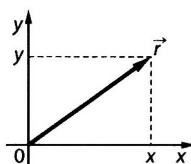
I. MECHANIKA

Fizikos dalis, nagrinėjanti kūnų mechaninio judėjimo ir sąveikos reiškinius, vadinama **mechanika**.

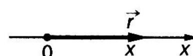
Vienas iš dažniausiai stebimų mechaninių reiškinių yra kūnų judėjimas. Tai kūno padėties kitimas kito kūno atžvilgiu. Kūnas, kurio atžvilgiu nurodoma kito kūno padėtis, vadinamas atskaitos kūnu. Norėdami tiksliai nurodyti kūno padėtį, turėtume nustatyti kiekvieno jo taško koordinates. Toks uždavinys labai sudėtingas. Jeigu kūnų matmenys daug kartų mažesni už atstumą tarp jų, dažnai tų matmenų nepaisome – kūnai laikomi **materialiaisiais taškais**. Materialusis taškas – tai realaus kūno modelis. Kūno (taško) padėtį galima nusakyti kryptine tiesės atkarpa, jungiančia atskaitos tašką su kūnu. Šis dydis vadinamas spinduliu-vektoriumi (matematiškai – vietos vektoriumi) $\vec{r}$ [m]. Dažniausiai kūno padėtis nusakoma koordinatėmis. Koordinatės – tai spindulio-vektoriaus projekcijos. Erdvėje kūno padėtis nusakoma trimis, plokštumoje – dviem, tiesėje – viena koordinate (žr. 14 pav., *a*, *b*, *c*).



a)



b)

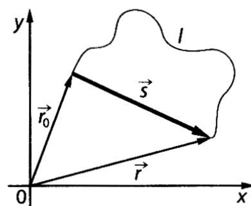


c)

14 pav.

Mechanikos dalis, kurioje nagrinėjami kūnų judėjimo dėsniai neatsižvelgiant į judėjimo priežastis, vadinama **kinematika**.

Kai kūno nueitas kelias yra daug didesnis už jo matmenis, kūnas laikomas materialiuoju tašku. Kai visi kūno taškai juda vienodai, užtenka nagrinėti tik vieno iš jų judėjimą; toks judėjimas vadinamas slenkamuoju. Jo metu kūnas irgi laikomas materialiuoju tašku.



15 pav.

Materialiojo taško judėjimo linija yra vadinama judėjimo **trajektorija** (15 pav.). Pagal jos formą judėjimas skirstomas į tiesiaeigį ir kreivaeigį. Šis smulkiau skirstomas į judėjimą apskritimu, parabole, elipse, cikloide, spirale bei kitomis kreivėmis. Pagal dėsningumus judėjimas gali būti tolyginis ir netolyginis, o šis dar skirstomas į tolygiai kintamą judėjimą ir svyravimą.

Materialiojo taško judėjimui apibūdinti naudojami šie dydžiai: laikas, kelias, poslinkis, greitis ir pagreitis.

Judėjimo trukmė nurodoma **laiku** t [s].

Kokį judesį atliko kūnas (kiek pajudėjo), parodo kelias l [m] ir poslinkis $\vec{s}$ [m]. **Kelias** – skaliarinis dydis. Juo laikomas nueitos trajektorijos ilgis. **Poslinkis** – vektorius, jungiantis pradinę padėtį su galutine. Jis parodo, kiek ir kokia kryptimi kūnas pasislinko: $\vec{s} = \vec{r} - \vec{r}_0$ arba $\vec{s} = \Delta\vec{r}$ (žr. 15 pav.).

Poslinkio projekcija x ašyje: $s_x = x - x_0$ (analogiškai y ir z ašyse).

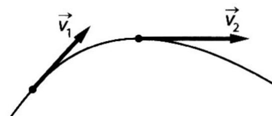
Tiesiaeigio judėjimo atveju kelias ir poslinkio modulis yra lygūs. Kreivaeigio – kelias visuomet didesnis už poslinkio modulį.

Kūno judėjimo sparta nurodoma **greičiu** v [m/s]. Yra naudojami net šeši greičiai – trys skaliariniai ir trys vektoriniai.

Tolyginis (tiesiaeigis ir kreivaeigis) judėjimas apibūdinamas skaliariniu greičiu. Juo laikomas kūno nueitas kelias per laiko vienetą: $v = \frac{l}{t}$. Vektoriumi $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$ arba $\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}}{t}$ apibūdinamas tiesiaeigis tolyginis judėjimas.

Netolyginis judėjimas nusakomas vidutiniais greičiais $v_{vid} = \frac{l}{t}$ ir $\vec{v}_{vid} = \frac{\vec{s}}{t}$. Judėjimo sparta kiekvienu momentu pasakoma momentiniu greičiu. Juo laikoma riba, prie kurios artėja vidutinis greitis, kai laiko tarpas, kuriam tas greitis randamas, artėja į nulį: $v = \lim\limits_{t\to 0} v_{vid}$ ir $\vec{v} = \lim\limits_{t\to 0} \vec{v}_{vid}$. Matematine prasme momentinis greitis yra poslinkio (kelio), tiksliau spindulio-vektoriaus (t. y. jo koordinatės) išvestinė

laiko atžvilgiu: $v = l_t'; \vec{v} = \vec{s}_t'; \vec{v} = \vec{r}_t'$; projekcija $v_x = x_t'$ (analogiškai projekcijoms y ir z ašyse).



16 pav.

Tiesiaeigio judėjimo atveju $v_{vid} = |\vec{v}_{vid}|$, kreivaeigio – visuomet $v_{vid} > |\vec{v}_{vid}|$. Skaliarinis momentinis greitis bet kokio judėjimo atveju lygus momentinio greičio vektoriaus moduliui $v = |\vec{v}|$. Kai kūnas juda tolygiai, vidutinis ir momentinis greičiai sutampa ir vadinami tiesiog greičiu. Vektoriniam greičiui ši taisyklė tinka vien tiesiaeigio tolyginio judėjimo atveju. Kreivaeigio judėjimo atveju momentinio greičio kryptis sutampa su trajektorijos taško, kuriame buvo kūnas, liestinės kryptimi (16 pav.).

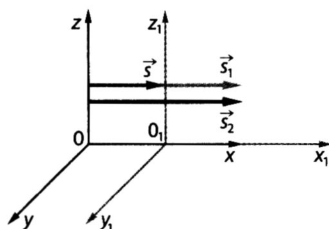
Kreivaeigio tolyginio judėjimo atveju, kalbant apie greičio vektorių, negalima sakyti, kad kūnas juda pastoviu greičiu, nes vektoriaus kryptis kinta. Nekinta tik modulis.

Netolyginis judėjimas apibūdinamas **pagreičiu** $\vec{a}\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$ – dydžiu, nusakančiu greičio kitimo spartą. Kaip ir greičiai, pagreičiai yra šeši.

Momentiniu pagreičiu laikome vidutinio pagreičio ribą, kai laikotarpis, per kurį pakito greitis, artėja į nulį: $\vec{a} = \lim\limits_{t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$. Matematinėje kalboje pagreitis yra greičio pirmoji išvestinė arba koordinatės antroji išvestinė laiko atžvilgiu $\vec{a} = \vec{v}_t'$ arba $\vec{a} = \vec{s}_t'', \vec{a} = \vec{r}_t''$. Išreiškus projekcijomis, $a_x = v_{xt}'$ arba $a_x = v_t''$ (analogiškai projekcijoms y ir z ašyse). Judėjimas, kurio momentinis pagreitis pastovus, vadinamas tolygiai kintamu. Jo pagreitį galima nusakyti formule $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$; čia $\vec{v}_0$ ir $\vec{v}$ – momentiniai (pradinis ir galinis) greičiai.

1. Padėties ir judėjimo reliatyvumas

Kadangi stebėtojai atskaitos kūnus gali pasirinkti laisvai, kiekvienam iš jų to paties kūno padėtis (t. y. ją nusakantys dydžiai) gali būti skirtinga. Skirtingas gali būti ir judėjimas (jį apibūdinantys dydžiai). Todėl sakoma, kad kūno padėtis ir judėjimas yra reliatyvūs. Tai reiškia, jog spindulys-vektorius (arba jo koordinatės), kelias ir poslinkis (trajektorijos forma), greitis bei pagreitis priklauso ne tik nuo kūno vietos bei judėjimo, bet ir nuo stebėtojo pasirinkimo.



17 pav.

Žinant kūno spindulį-vektorių $\vec{r}_1$ pirmojo stebėtojo atžvilgiu, kūno spindulys-vektorius $\vec{r}_2$ antrojo stebėtojo atžvilgiu randamas taip: $\vec{r}_2 = \vec{r}_1 + \vec{r}$; čia $\vec{r}$ – spindulys-vektorius, nurodantis pirmojo stebėtojo padėtį antrojo atžvilgiu. Iš poslinkio, greičio ir pagreičio apibrėžimų aišku, kad $\vec{s}_2 = \vec{s}_1 + \vec{s}$, $\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}$ ir $\vec{a}_2 = \vec{a}_1 + \vec{a}$; čia $\vec{s}_1$, $\vec{v}_1$ ir $\vec{a}_1$ – kūno poslinkis, greitis ir pagreitis pirmojo stebėtojo $(x_1y_1z_1)$ atžvilgiu: $\vec{s}_2$, $\vec{v}_2$ ir $\vec{a}_2$ – kūno poslinkis, greitis ir pagreitis antrojo stebėtojo (xyz) atžvilgiu; $\vec{s}$, $\vec{v}$ ir $\vec{a}$ – pirmojo stebėtojo poslinkis, greitis ir pagreitis antrojo atžvilgiu (17 pav.).

Kūno pagreičiai tiek nejudančioje, tiek jos atžvilgiu tiesiai ir tolygiai judančioje sistemoje yra vienodi ir nepriklauso nuo sistemų greičio viena kitos atžvilgiu. Jei atskaitos sistemos viena kitos atžvilgiu nejuda, reliatyvios yra tik kūno koordinatės (spinduliai-vektoriai).

2. Materialiojo taško judėjimo dėsniai

2.1. Tolygiai kintamas judėjimas

Tolygiai kintamu vadiname tokį judėjimą, kurio metu kūno momentinis greitis kinta vienodai. Matematiniai šio judėjimo dėsniai tokie:

1. Judėjimo pagreitis yra pastovus: $\vec{a} = const.$

2. Iš pagreičio apibrėžimo galima nustatyti, kad momentinis greitis kinta tiesiškai laiko atžvilgiu: $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ arba $v_x = v_{0x} + a_x t$ (analogiškai projekcijoms y ir z ašyse).

3. Atliktas poslinkis $\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$ arba $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ (analogiškai y ir z ašyse).

4. Kūno (taško) padėtį pasakantis spindulys-vektorius $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$ arba jo koordinatė $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ (analogiškai y ir z ašyse).

Nagrinėjant tolygiai kintamą judėjimą (sprendžiant uždavinius), patogu naudotis tarpinėmis iš judėjimo dėsnių gaunamomis formulėmis:

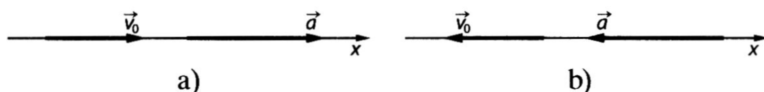
$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x};\ s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t;\ v_{\text{vid}\,x} = \frac{v_{0x} + v_x}{2};\ v_x = \sqrt{v_{0x}^2 + 2a_x \cdot s_x}.$$

Galimi šie tolygiai kintamo judėjimo atvejai:

1) Tiesiaeigis tolygiai greitėjantis ($\vec{v}_0$ ir $\vec{a}$ kryptys sutampa (žr. 18 pav.). Tokiu atveju racionaliausia koordinačių ašį pasirinkti nukreiptą $\vec{v}_0$ kryptimi arba priešingą $\vec{v}_0$ krypčiai. Tada vektorių projekcijos į kitas statmenas ašis lygios nuliui. Tuomet, kai:

a) vektorių $\vec{v}_0$ ir $\vec{a}$ bei koordinačių ašies x kryptys sutampa, judėjimo dėsniai yra tokie:

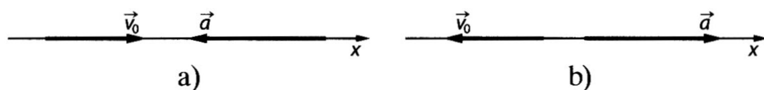
$$v_x = v = v_0 + at;\ s_x = s = v_0 t + \frac{at^2}{2};\ x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$



18 pav.

b) vektorių $\vec{v}_0$ ir $\vec{a}$ kryptys sutampa, bet yra priešingos koordinačių ašies x krypčiai, judėjimo dėsniai tokie: $v_x = -v = -v_0 - at$ arba $v = v_0 + at$; $s_x = -s = -v_0 t - \frac{at^2}{2}$ arba $s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$; $x = x_0 - v_0 t - \frac{at^2}{2}$.

2) Tiesiaeigis tolygiai lėtėjantis ($\vec{v}_0$ ir $\vec{a}$ kryptys priešingos; žr. 19 pav.). Tuomet, kai:

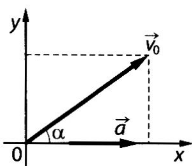


19 pav.

a) vektoriaus $\vec{v}_0$ kryptis sutampa su koordinačių ašies x kryptimi, o $\vec{a}$ kryptis jai priešinga, gauname: $v_x = v_0 - at$; $s_x = v_0 t - \frac{at^2}{2}$; $x = x_0 + v_0 t - \frac{at^2}{2}$;

b) vektoriaus $\vec{v}_0$ kryptis priešinga koordinačių ašies x krypčiai, o $\vec{a}$ kryptis sutampa su x kryptimi, gauname: $v_x = -v_0 + at$; $s_x = -v_0 t + \frac{at^2}{2}$; $x = x_0 - v_0 t + \frac{at^2}{2}$.

Tokiu atveju kūnas juda lėtėdamas, kol sustoja, o po to greitėdamas juda atgal.



20 pav.

3) Kreivaeigis tolygiai kintamas ($\vec{v}_0$ ir $\vec{a}$ sudaro tam tikrą kampą). Šiuo atveju beveik visada racionaliausia koordinačių ašis pasirinkti taip, kad vektoriai $\vec{v}_0$ ir $\vec{a}$ sutaptų su plokštuma $y0x$, o vieną iš ašių nukreipti pagreičio arba priešinga jam kryptimi (20 pav.). Tuomet:

$$v_x = v_0 \cos\alpha + at; \quad s_x = v_0(\cos\alpha)t + \frac{at^2}{2}; \quad x = x_0 + v_0(\cos\alpha)t + \frac{at^2}{2};$$

$$v_y = v_0 \sin\alpha; \quad s_y = v_0(\sin\alpha)t; \quad y = y_0 + v_0(\sin\alpha)t.$$

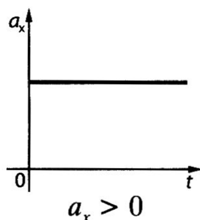
Iš koordinačių kitimo dėsnių galima rasti matematinę jų tarpusavio priklausomybę, pavyzdžiui, $y = f(x)$. Ši priklausomybė vadinama trajektorijos lygtimi. Jos grafikas yra parabolė – kūno judėjimo $y0x$ plokštumoje trajektorija.

Tolygiai kintamo judėjimo dėsningumus galima parodyti grafiškai:

1) Momentinio pagreičio priklausomybė nuo judėjimo laiko:

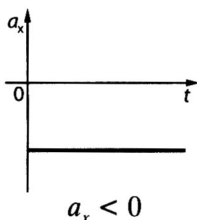
$a_x = const$ – funkcijos $a_x = f(t)$ grafikas yra horizontali tiesė (žr. 21 pav., *a*, *b*).

Šių grafikų su laiko ašimi ribojamas plotas parodo greičio pokytį. Jei grafikas virš laiko ašies, tai $\Delta v_x > 0$, jei žemiau – tai $\Delta v_x < 0$ (plg. 21 pav.).



$a_x > 0$

a)

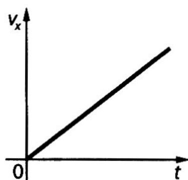


$a_x < 0$

b)

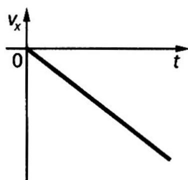
21 pav.

2) Momentinio greičio priklausomybė nuo judėjimo laiko:
$v_x = v_{0x} + a_x t$ – šios funkcijos grafikas yra tiesė (žr. 22 pav.).



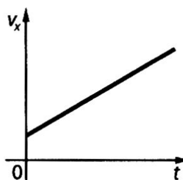
$v_{0x} = 0,\ a_x > 0.$

a)



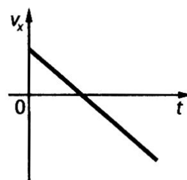
$v_{0x} = 0,\ a_x < 0.$

b)



$v_{0x} > 0,\ a_x > 0.$

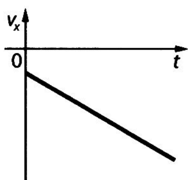
c)

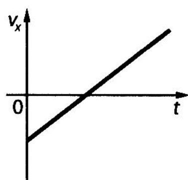


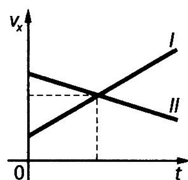
$v_{0x} > 0,\ a_x < 0.$

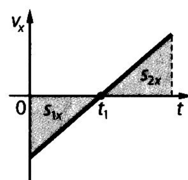
d)

22 pav.



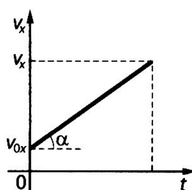






$v_{0x} < 0,\ a_x < 0.$ e) $v_{0x} < 0,\ a_x > 0.$ f) g) h)

22 pav.



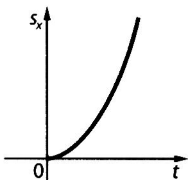
23 pav.

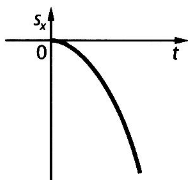
Grafikų *d* ir *f* susikirtimo su laiko ašimi tašką atitinkančiu laiko momentu kūnas sustojo ir nuo tos akimirkos juda tolygiai greitėdamas atgal. Dviejų pavaizduotų grafikų (*I* ir *II*) susikirtimo tašką atitinkančiu laiko momentu kūnų greičiai buvo vienodi (22 pav., *g*).

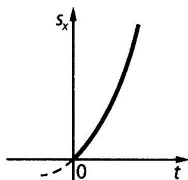
Iš grafiko statumo galima spręsti apie pagreitį. Grafiko su laiko ašimi sudaromo kampo (žr. 23 pav.) tangento reikšmė atitinka kūno judėjimo pagreitį: $\mathrm{tg}\alpha = \dfrac{v_x - v_{0x}}{t} = a_x$. Jei grafikas kyla – $a_x > 0$, jei leidžiasi – $a_x < 0$. Iš greičio kitimo grafiko galima spręsti ne tik apie pagreitį, bet ir apie kūno atliktą poslinkį. Jis yra proporcingas grafiko ir laiko ašies ribojamam plotui (22 pav., *h*). Jei plotas žemiau laiko ašies – poslinkio projekcija neigiama ($s_{1x} < 0$), jei virš laiko ašies – teigiama ($s_{2x} > 0$).

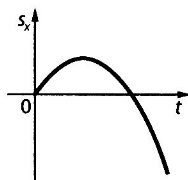
3) Poslinkio priklausomybė nuo judėjimo laiko:

$s_x = v_{0x}t + \dfrac{a_x t^2}{2}$ – šios funkcijos grafikas yra parabolė (jos dalis) (24 pav.):



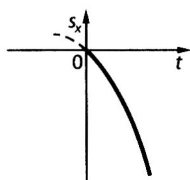






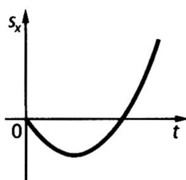
$v_{0x} = 0,\ a_x > 0.$ a) $v_{0x} = 0,\ a_x < 0.$ b) $v_{0x} > 0,\ a_x > 0.$ c) $v_{0x} > 0,\ a_x < 0.$ d)

24 pav.



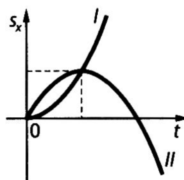
$v_{0x} < 0,\ a_x < 0.$

e)



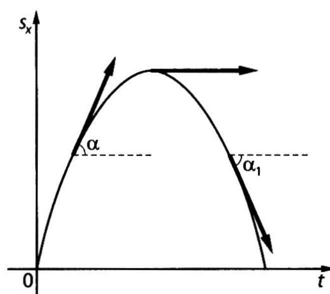
$v_{0x} < 0,\ a_x > 0.$

f)



g)

24 pav.



25 pav.

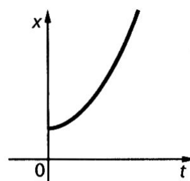
Grafikų *d* ir *f* susikirtimo su laiko ašimi tašką atitinkančiu laiko momentu kūnas sugrįžo į pradinę vietą ($s_x = 0$).

Poslinkio priklausomybės nuo laiko grafiko liestinės su laiko ašimi sudaromo kampo (žr. 25 pav.) tangento reikšmė atitinka kūno momentinį greitį. Jei liestinė kyla, tai $v_x > 0$, jei leidžiasi – $v_x < 0$.

Parabolės viršūnės tašką atitinkančiu laiko momentu kūnas stovėjo ($v_x = 0$). Neigiamas laikas (*c* ir *e* grafikų punktyrinė linija) rodo, kad tai buvo prieš stebėjimo pradžią, teigiamas – kad tuo laiku kūnas buvo stebimas. Grafikų (*I* ir *II*) susikirtimo tašką atitinkančiu laiko momentu kūnai buvo atlikę vienodus poslinkius (24 pav., *g*).

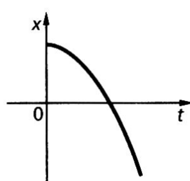
4) Spindulio-vektoriaus (jo koordinatės) priklausomybė nuo judėjimo laiko:

$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ – šios funkcijos grafikas nuo $s_x = f\ (t)$ grafiko skiriasi tik tuo, kad jo pradžia yra ne ašių susikirtimo taške. Jeigu $x_0 > 0$, $x = f\ (t)$ grafikas yra pakilęs lyginant su $s_x = f(t)$ grafiku, jei $x_0 < 0$ – nusileidęs (žr. 26 pav.):



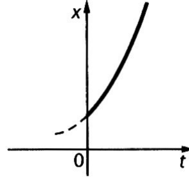
$x_0 > 0, v_{0x} = 0, a_x > 0.$

a)



$x_0 > 0, v_{0x} = 0, a_x < 0.$

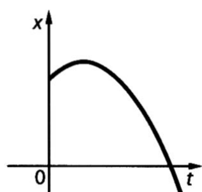
b)



$x_0 > 0, v_{0x} > 0, a_x > 0.$

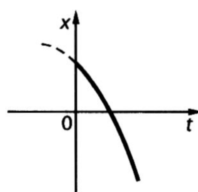
c)

26 pav.



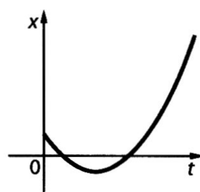
$x_0 > 0,\ v_{0x} > 0,\ a_x < 0.$

d)



$x_0 > 0,\ v_{0x} < 0,\ a_x < 0.$

e)

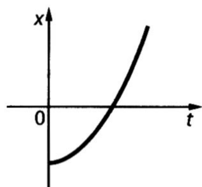


$x_0 > 0, v_{0x} < 0, a_x > 0.$

f)

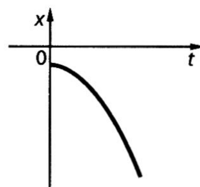
26 pav.

Analogiškai, kai $x_0 < 0$ (27 pav.):



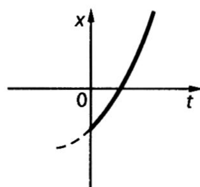
$x_0 < 0,\ v_{0x} = 0,\ a_x > 0.$

a)



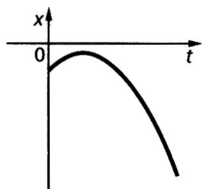
$x_0 < 0,\ v_{0x} = 0,\ a_x < 0.$

b)



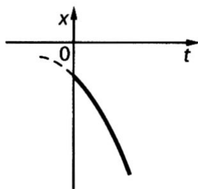
$x_0 < 0, v_{0x} > 0, a_x > 0.$

c)



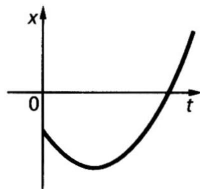
$x_0 < 0, v_{0x} > 0, a_x < 0.$

d)



$x_0 < 0,\ v_{0x} < 0,\ a_x < 0.$

e)



$x_0 < 0, v_{0x} < 0, a_x > 0.$

f)

27 pav.

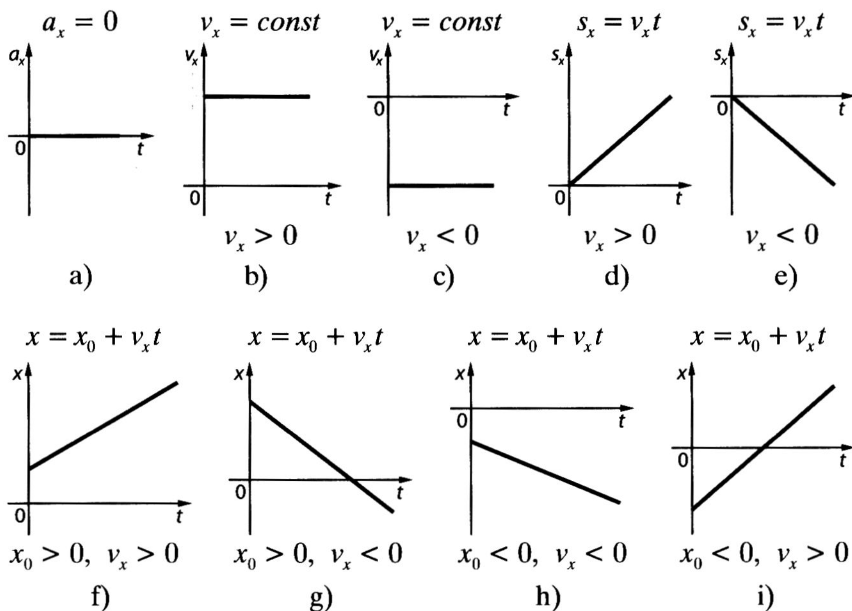
Kai toje pačioje koordinačių sistemoje pavaizduoti du $x = f(t)$ grafikai, jų susikirtimo taškus atitinkančiais laiko momentais kūnai susitiko (pavijo vienas kitą). Grafiko susikirtimo su laiko ašimi taškus atitinkančiais laiko momentais kūnas buvo atskaitos kūno vietoje (koordinačių pradžioje).

2.2. Tiesiaeigis tolyginis judėjimas

Judėjimas, kurio metu kūnas per vienodus laiko tarpus pasislenka vienodai, vadinamas tiesiaeigiu tolyginiu. Jį apibūdinantis momentinis greitis yra pastovus ($\vec{v} = const$), o pagreičio nėra ($\vec{a} = 0$). Galima sakyti, kad tiesiaeigis tolyginis judėjimas – tai tiesiaeigis tolygiai kintamas judėjimas, kai judėjimo pagreitis lygus nuliui. Iš tolygiai kintamo judėjimo dėsnių matyti, kad:

$$\vec{a} = 0; \quad \vec{v} = \vec{v}_0 = const; \quad \vec{s} = \vec{v}t; \quad \vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}t \quad \text{arba} \quad x = x_0 + v_x t.$$

Šie dėsningumai grafiškai vaizduojami taip (28 pav.):



28 pav.

2.3. Tolyginis judėjimas apskritimu

Kadangi materialiojo taško tolyginis judėjimas apskritimu yra pasikartojantis reiškinys, jis apibūdinamas dar dviem fizikiniais dydžiais: periodu ir dažniu. **Periodu** vadiname laiką, per kurį kūno padėtį nusakantis spindulys-vektorius apsisuka vieną kartą: $T = \frac{t}{N}$, [s]; čia t – judėjimo laikas, N – per tą laiką nueitų apskritimų skaičius. **Dažniu** nusakoma, kiek apskritimų apeina kūnas per laiko

vienetą: $n = \frac{N}{t}$ [s^{-1}]. Dažnis ir periodas – vienas kitam atvirkščiai proporcingi dydžiai: $n = \frac{1}{T}$.

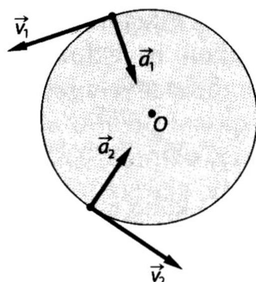
Iš greičio apibrėžimo aišku, kad tolygiai apskritimu judančio kūno momentinio greičio modulį išreiškus per periodą – $v = \frac{2\pi R}{T}$, o per dažnį – $v = 2\pi R n$; čia R – apskritimo spindulys, $\pi \approx 3{,}14...$

Tolygiai apskritimu judančio kūno momentinis greitis nukreiptas bet kuriame apskritimo taške jo liestinės kryptimi. Jis nuolat keičiasi, todėl toks judėjimas apibūdinamas pagreičiu. Šis pagreitis vadinamas **įcentriniu**, nes bet kuriuo momentu yra statmenas momentiniam greičiui, t. y. nukreiptas į apskritimo centrą (29 pav.). Įcentrinio pagreičio, kaip ir momentinio greičio, modulis yra pastovus. Tačiau šis judėjimas nėra tolygiai kintamas, nes pastovus tik pagreičio modulis, o kryptis nuolat kinta. Įcentrinio pagreičio modulis susijęs su momentinio greičio moduliu – $a = \frac{v^2}{R}$, periodu – $a = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$, dažniu – $a = 4\pi^2 R n^2$.

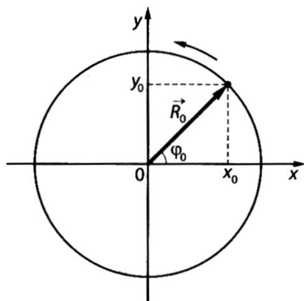
Nagrinėdami materialiojo taško judėjimą apskritimu, dažniausiai atskaitos tašku pasirenkame apskritimo centrą. Tuomet kūno koordinatės, greičio ir pagreičio projekcijos kinta laiko atžvilgiu pagal sinuso arba kosinuso dėsnius. 30, 31, 32 pav. brėžinius atitinkančiu atveju kūno koordinatės kinta pagal šiuos dėsnius:

$$x = R \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_0\right) \text{ ir } y = R \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_0\right);$$

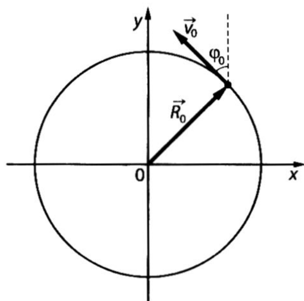
čia φ_0 [rad] – pradinę padėtį nusakantis dydis – **pradinis kampas**, 2π [rad] – pilnutinis kampas.



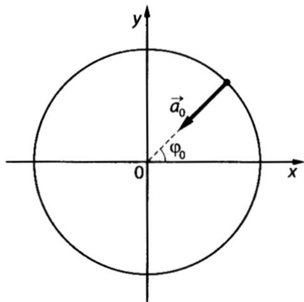
29 pav.



30 pav.



31 pav.



32 pav.

Iš Pitagoro teoremos randame, kad $x^2 + y^2 = R^2$. Tai ir yra kūno judėjimo trajektorijos (apskritimo) lygtis.

Šiuo atveju kūno pagreičio priklausomybės nuo laiko yra tokios:

$$v_x = x'_t = -v \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_0\right) \text{ ir } v_y = v'_t = v \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_0\right).$$

O kūno pagreičio kitimo dėsniai yra tokie:

$$a_x = v'_{xt} = -a \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_0\right) \text{ ir } a_y = v'_{yt} = -a \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_0\right).$$

Jei pradinę kūno padėtį nurodantis kampas φ_0 būtų su kita koordinačių ašimi vektoriaus $\vec{R}_0$ sudaromas kampas arba pasikeistų kūno judėjimo kryptis, tai koordinačių, greičio ir pagreičio kitimų dėsniuose galėtų pakisti sinuso ir kosinuso funkcijos bei „+“ ir „– “ ženklai. Iš šių dėsnių surastos koordinatės, greičio ir pagreičio projekcijos, kai $t = 0$, yra pradinės. Nors judėjimo metu (kintant laikui) kinta koordinatės, greičio ir pagreičio projekcijos, tačiau šių vektorių moduliai lieka pastovūs. Todėl dėsniuose vietoj pradinių R_0, v_0 ir a_0 reikšmių rašome R, v ir a.

Kadangi analogiška yra ir svyravimo dėsnių matematinė išraiška, grafiškai šie dėsningumai pavaizduoti nagrinėjant svyravimus.

3. Dinamika

3.1. Jėga. Masė. Niutono dėsniai. Jėgos momentas

Mechanikos dalis, kurioje nagrinėjami kūno judėjimo dėsniai atsižvelgiant į judėjimo priežastis, vadinama **dinamika**. Kaip kūnas juda (ar nejuda), priklauso nuo kitų kūnų veikimo, pasirinktos atskaitos sistemos, pradinio greičio ir paties kūno.

Visada galima rasti atskaitos sistemas, kurių atžvilgiu nagrinėjamas kūnas nejuda arba juda tiesiai ir tolygiai, kai jo niekas neveikia arba kitų kūnų poveikiai kompensuojasi (atsveria vieni kitus). Šis Izaoko **Niutono** suformuluotas **pirmasis dėsnis** dažnai vadinamas **inercijos dėsniu**. Atskaitos sistemos, kuriose kūnas taip juda, vadinamos inercinėmis, o pats judėjimas – judėjimu iš inercijos. Žinant vieną inercinę atskaitos sistemą nesunku surasti kitas. Tiesiai ir tolygiai (be pagreičio) judančios sistemos inercinės sistemos atžvilgiu taip pat bus inercinės, o judančios su pagreičiu – neinercinės. Surasti absoliučiai tikslią (idealią) inercinę atskaitos sistemą neįmanoma, nes negalima nustatyti, ar tiksliai, ar tik apytikriai kompen-

suojasi veikimai. Su Žemės paviršiaus taškais susietos sistemos laikomos inercinėmis. Tačiau kai atskaitos tašku pasirenkamas Žemės centras, su paviršiaus taškais (išskyrus ašigalius) susietos atskaitos sistemos tampa neinercinės, nes sukantis Žemei šie taškai juda apskritimais, t. y. su pagreičiu. Su centru susieta sistema taip pat nėra ideali, kadangi vieno nejudančio centro nėra: Žemė skrieja apie Saulę, Saulė – apie Galaktikos centrą, galaktikos taip pat juda Visatoje. Tačiau su galaktikomis, žvaigždėmis, Saule, Žemės centru ir jos paviršiaus taškais susietas sistemas galima apytiksliai laikyti inercinėmis, nes jų judėjimo pagreičiai viena kitos atžvilgiu maži.

Kūnų veikimas visuomet yra abipusis, todėl šis reiškinys vadinamas sąveika. Jos metu visada abu kūnai veikia vienas kitą ir juda su pagreičiais vienas kito atžvilgiu (jei jie sąveikauja tik tarpusavyje). Įsivaizduokime du stebėjimo pradžioje vienas kito atžvilgiu nejudančius kūnus, kurie traukia vienas kitą. Praėjus tam tikram laikui jie susitiks taške, kuris vadinamas šių kūnų masių centru. Su šiuo tašku susieta atskaitos sistema bus inercinė, o su kūnais – neinercinė.

Kūnų judėjimo pagreičiai inercinės atskaitos sistemos atžvilgiu priklauso nuo jų tarpusavio sąveikos ir inertiškumo. **Inertiškumas** – kūno savybė išlaikyti rimtį arba pastovų judėjimą. Inertiškumo matas yra **masė** m. Masė – skaliarinis dydis. Jos vienetas SI sistemoje – kilogramas (kg); tai vienas iš septynių bazinių šios sistemos vienetų. Kūnas, kuris vienodai veikiamas juda su mažesniu pagreičiu, yra inertiškesnis, jo masė didesnė. Kūno masė nustatoma dviem būdais: 1) sveriant; 2) kūnui sąveikaujant su žinomos masės kūnu. Sąveikos metu abu kūnai juda inercinės atskaitos sistemos atžvilgiu su pagreičiais, kurių kryptys priešingos, o santykis pastovus. Jis priklauso tik nuo tų kūnų inertiškumo (masių).

$\frac{a_1}{a_2}=\frac{m_2}{m_1}$ – tai kūnų sąveikos dėsnis. Kūnų sąveika (vieno poveikis kitam) charakterizuojama vektoriniu dydžiu – jėga $\vec{F}$. Šiuo dydžiu laikome veikiamo kūno masės ir pagreičio, kuriuo jis juda, sandaugą: $\vec{F}=m\vec{a}$. Jėgos vienetas SI sistemoje yra niutonas (N). $1\,\mathrm{N}=1\,\mathrm{kg}\cdot 1\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$. Veikimą, kurio metu 1 kg masės kūnas juda 1 m/s^2 pagreičiu, nusakanti jėga lygi 1 N.

Iš kūnų sąveikos dėsnio aišku, kad $m_1\vec{a}_1=-m_2\vec{a}_2$ arba $\vec{F}_1=-\vec{F}_2$. Sąveikos metu abu kūnai veikia vienas kitą vienodo dydžio jėga, tik priešingomis kryptimis. Ši nauja sąveikos dėsnio išraiška vadinama **trečiuoju Niutono dėsniu**.

Nors kūnų sąveika abipusė, dažnai mus domina vieno iš veikiamų (sąveikaujančių) kūnų judėjimas. Paprastai nagrinėjamą kūną tuo pačiu metu veikia ne vienas, o keli kūnai (t. y. jis sąveikauja su keliais). Tada bendras visų kūnų veikimas pasakomas jėgų atstojamąja, kuri lygi visus veikimus nusakančių jėgų vektorinei sumai: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_N$.

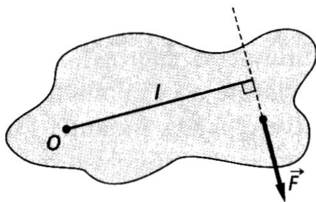
Kūno judėjimo pagreitis inercinės atskaitos sistemos atžvilgiu lygus jį veikiančių jėgų atstojamosios ir jo masės santykiui:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

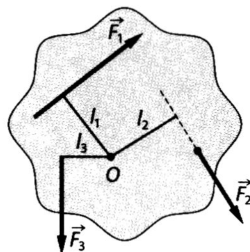
Tai **antrasis Niutono dėsnis.**

Iš šio dėsnio matyti, kad kai kūną veikiančių jėgų atstojamoji lygi nuliui ($\vec{F} = 0$), jis inercinės atskaitos sistemos atžvilgiu nejuda (yra rimties būsenos) arba juda tiesiai ir tolygiai ($\vec{a} = 0$). Tai nauja pirmojo Niutono dėsnio formuluotė.

Kūnas, kurio negalima laikyti materialiuoju tašku, veikiamas kitų kūnų gali ne tik slinkti (visi kūno taškai juda vienodai), bet ir suktis (visi taškai juda apskritimais, kurių centrai yra tiesėje – sukimosi ašyje). Kaip kūnas verčiamas suktis, nusakoma fizikiniu dydžiu – **jėgos momentu** M, kuris lygus jėgos modulio ir jėgos peties sandaugai: $M = Fl$. Jėgos petimi l [m] laikome trumpiausią atstumą (statmenį) nuo sukimosi ašies iki jėgos veikimo linijos (žr. 33 pav.). SI vienetų sistemoje jėgos momentas matuojamas niutonmetrais (N · m). 1 N · m – jėgos momentas, kurį sukelia kūną veikianti 1 N jėga, kai jos veikimo linija yra 1 m atstumu nuo sukimosi ašies. Dažniausiai tuo pat metu kūną verčia suktis ne vienas kūnas, o keli. Tuomet bendras sukamasis veikimas nusakomas atstojamuoju jėgų momentu, kuris lygus visų jėgos momentų algebrinei sumai, laikant viena kryptimi (pavyzdžiui, pagal laikrodžio rodyklę) sukančius momentus teigiamais, o priešinga (prieš laikrodžio rodyklę) – neigiamais. (Iš tiesų jėgos momentas yra vektorinis dydis, lygus sukančios jėgos $\vec{F}$ ir spindulio-vektoriaus $\vec{r}$ vektorinei sandaugai. $\vec{M}$ kryptis statmena plokštumai, kurioje yra $\vec{F}$ ir $\vec{r}$, todėl kūną sukančių jėgų momentų atstojamasis momentas $\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + ... + \vec{M}_N$.) Pagal 34 paveikslėlį, $M = M_1 + M_2 + M_3$ arba $M = F_1l_1 + F_2l_2 - F_3l_3$. Bendruoju atveju $M = M_1 + M_2 + ... + M_N$. Kai ši suma lygi nuliui, kūnas yra pusiausviras: jis nesisuka arba sukasi tolygiai. Tai ir yra **jėgų momentų taisyklės** esmė.



33 pav.



34 pav.

Taigi absoliučiai kieto kūno pusiausvyros sąlygos yra šios:

1) kūnas nejuda arba tolygiai slenka, jeigu jį veikiančių jėgų atstojamoji lygi nuliui:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_N = 0;$$

2) galintis suktis kūnas nesisuka arba sukasi tolygiai aplink savo ašį, jeigu jį veikiančių jėgų momentų bet kokios įsivaizduojamos sukimosi ašies atžvilgiu algebrinė suma lygi nuliui:

$$M_1 + M_2 + ... + M_N = 0.$$

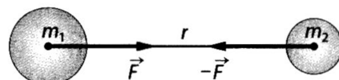
3.2. Sąveikos (jėgų) rūšys

Mūsų pasaulio objektams būdinga keturių rūšių sąveika: 1) visuotinės traukos (gravitacinė); 2) elektromagnetinė; 3) branduolinė; 4) silpnoji. Nagrinėjant mechaninius reiškinius, susiduriama su visuotine trauka ir elektromagnetinės prigimties sąveika.

Visuotinė trauka. Gebėjimas sąveikauti šios rūšies sąveika vienareikšmiškai priklauso nuo kitos kūnų savybės – inertiškumo bei jų formos ir atstumo tarp jų. Jeigu kūnus galima laikyti materialiaisiais taškais, tai jų tarpusavio trauką apibūdinanti jėga (žr. 35 pav.) yra tiesiogiai proporcinga jų masių sandaugai ir atvirkščiai proporcinga atstumo tarp jų kvadratui:

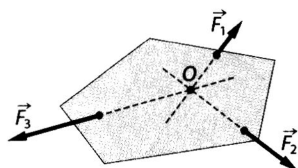
$F = G\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$ – **visuotinės traukos dėsnis**;

čia $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\dfrac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}}$ – visuotinės traukos (gravitacijos) konstanta.

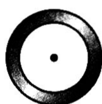


35 pav.

Kūnus laikome materialiaisiais taškais, kai atstumas tarp jų daug didesnis



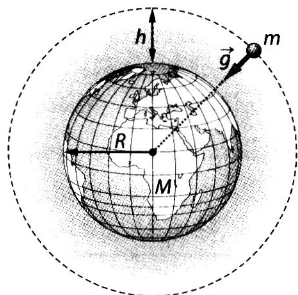
36 pav.


37 pav.

už jų matmenis. Taip pat materialiuoju tašku laikomas rutulys (jo centras), kai medžiaga visose jo vietose yra vienodo tankio.

Vienas iš atvejų, kada judantis kūnas gali būti laikomas materialiuoju tašku, yra slenkamasis judėjimas. Kiekvienas taškas turi tik vieną kryptį (antra – jai priešinga), kuria veikiant tą tašką kūnas slenka. Šių krypčių susikirtimo taškas laikomas kūno **masės centru** (36 pav.). Yra kūnų, kurių masės centras nėra pačiame kūne (pvz., žiedo, žr. 37 pav.). Materialusis taškas, sutampantis su kūno masės centru, yra to kūno abstraktus modelis. Kūnas, veikiamas kryptimi, neinančia per masės centrą, suksis, kol masės centras atsidurs jėgos veikimo linijoje. Nors Žemė traukia kiekvieną kūno tašką, laikome, kad visa kūno masė yra jo masės centre, ir Žemė veikia tik šį kūno tašką. Dėl to kūno masės centras dar vadinamas **sunkio centru**. Sprendžiant uždavinius, kai kūnas absoliučiai kietas, visos jį veikiančios jėgos dėl paprastumo brėžiamos iš vieno taško – sunkio centro.

Nors kūnų yra begalės, mūsų aplinkoje vykstantiems reiškiniams esminę įtaką daro tik Žemės sukeliama trauka. Kitų kūnų veikimo nepaisome, nes jų masės palyginti mažos arba jie yra labai toli. Žemės visuotinės traukos jėgą išskiriame iš kitų visuotinės traukos jėgų ir vadiname sunkio jėga F_S. Ji veikia kūno masės centrą ir yra nukreipta į Žemės centrą. Kadangi paprastai nagrinėjamo kūno masė m daug mažesnė už Žemės masę M, šių 2 kūnų sistemos masių centras praktiškai sutampa su Žemės centru, o su Žeme susieta atskaitos sistema laikoma inercine. Tik Žemės veikiamo kūno judėjimas vadinamas laisvuoju kritimu, o šį judėjimą apibūdinantis pagreitis – laisvojo kritimo pagreičiu g. Iš antrojo Niutono dėsnio aišku, kad $\vec{g} = \frac{\vec{F}_s}{m}$, išreiškus moduliais – $g = \frac{F_s}{m}$; $\vec{g}$ visada nukreiptas į Žemės centrą (38 pav.).



38 pav.

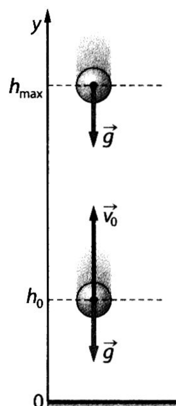
Iš visuotinės traukos dėsnio matyti, kad $F_S = G\frac{M \cdot m}{(R+h)^2}$; čia R – Žemės spindulys, h – aukštis virš Žemės paviršiaus, kuriame yra kūnas.

Todėl $g_h = G\frac{M}{(R+h)^2}$. Prie Žemės paviršiaus esančiam kūnui ($h << R$) $g = G\frac{M}{R^2} \approx 9{,}83\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

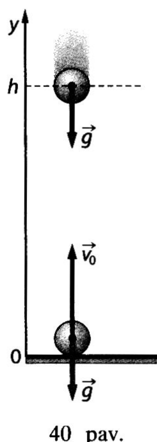
Tokiu pagreičiu juda laisvai krintantys kūnai Žemės centro (taip pat ašigalių) atžvilgiu. Kitų Žemės paviršiaus taškų atžvilgiu pagreitis yra truputį mažesnis (45° platumoje – 9,81 m/s^2, pusiaujyje – 9,78 m/s^2), nes Žemei sukantis jie juda įcentriniais pagreičiais. Su šiais taškais susietos atskaitos sistemos yra neinercinės ir jose antrasis Niutono dėsnis negalioja. Tačiau dažnai tokios sistemos laikomos inercinėmis, nes jose susidaranti paklaida nedidelė. Nors kūnui kylant laisvojo kritimo pagreitis mažėja, o krentant – didėja, dažniausiai laisvasis kūnų kritimas laikomas tolygiai kintamu, kadangi nukristas atstumas būna daug kartų mažesnis už Žemės spindulį, ir g mažai pakinta.

Vertikaliai aukštyn arba žemyn mesto kūno laisvojo judėjimo trajektorija yra tiesė, o kampu į horizontą arba horizontaliai – parabolė arba jos dalis. Jo judėjimą galima aiškinti tolygiai kintamo judėjimo dėsniais, tik vietoj $\vec{a}$ naudojamas $\vec{g}$. Todėl vertikaliai judančio kūno $v_y = v_{0y} + g_y t$; $s_y = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}$; $y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}$.

Nagrinėjant vertikaliai aukštyn mesto kūno judėjimą, patogiausia koordinačių ašį nukreipti vertikaliai aukštyn (39 pav.). Tuomet $v_y = v_0 - gt$, $s_y = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$ ir $h = h_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2}$. Kūnas kyla tolygiai lėtėdamas ($v_y > 0$), kol sustoja, po to krenta tolygiai greitėdamas ($v_y < 0$). Kad sužinotume mus dominančius dydžius (judėjimo laiką, aukštį, kuriame yra kūnas, bei greitį bet kuriuo momentu), naudodamiesi judėjimo dėsniais sudarome lygtis ar lygčių sistemas ir jas išsprendžiame. Atkreipkite dėmesį, kad aukščiausiame trajektorijos taške $v_y = 0$, $y = h = h_{max}$. Kūnui nukritus į pradinę padėtį $y = h_0$, o į koordinačių pradžią $y = 0$. Iš viso judėjimo laiko (per kurį kūnas sugrįžo atgal į pradi-



39 pav.

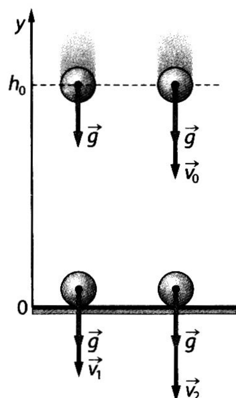


40 pav.

nę vietą) atėmę kilimo laiką pamatysime, kad kilimo ir kritimo laikai yra lygūs. Todėl judėjimas aukštyn ir žemyn į tą patį lygį absoliučiai simetriškas: kilimo kelias lygus kritimo keliui ($s_y = 0$), kilimo laikas lygus kritimo laikui, pradinio greičio modulis lygus galiniam greičio moduliui kritimo pabaigoje, t.y. kildamas ir krisdamas kūnas kiekvieną trajektorijos tašką praskrieja to paties modulio greičiu (kryptys priešingos).

Vertikaliai aukštyn iš $y_0 = h_0 = 0$ (žr. 40 pav.) pradiniu greičiu $v_{0y} = v_0$ mesto kūno greitis aukščiausiame trajektorijos taške $y = h = h_{max}$ lygus nuliui ($v_y = 0$). Laisvojo kritimo pagreitis visada nukreiptas žemyn ($g_y = -g$) (kylant judėjimas dėl Žemės traukos yra tolygiai lėtėjantis, krintant – tolygiai greitėjantis). Todėl judėjimo dėsniai šiuo atveju: $0 = v_0 - gt$ (iš čia galima apskaičiuoti pradinį greitį $v_0 = gt$ arba kilimo laiką $t = \frac{v_0}{g}$); $s_y = h$; $h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$ arba, kai neduotas laikas – $h = \frac{0 - v_0^2}{-2g} = \frac{v_0^2}{2g}$.

Kūną iš tam tikro aukščio $y_0 = h_0$ paleidus laisvai kristi, $v_0 = 0$. Jei koordinačių ašis nukreipta į viršų (žr. 41 pav.), tai $g_y = -g$, greitis kritimo pabaigoje $v_y = -v_1$, koordinatė judėjimo pabaigoje $y = h = 0$, o judėjimo dėsniai šiuo atveju tokie: $-v_1 = -gt_1$ arba $v_1 = gt_1$; $s_y = -\frac{gt_1^2}{2}$ ir $s_y = -\frac{v_1^2}{2g}$; $0 = h_0 - \frac{gt_1^2}{2}$ arba $h_0 = \frac{gt_1^2}{2}$.

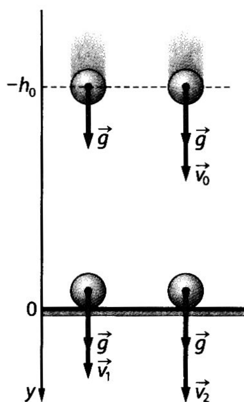


41 pav.

Kai kūnas metamas žemyn greičiu $v_{0y} = -v_0$, lygtys yra tokios: $-v_2 = -v_0 - gt_2$ arba $v_2 = v_0 + gt_2$; $s_y = -v_0 t_2 - \frac{gt_2^2}{2}$ ir $s_y = -\frac{v_2^2 - v_0^2}{2g}$; $0 = h_0 - v_0 t_2 - \frac{gt_2^2}{2}$ arba $h_0 = v_0 t_2 + \frac{gt_2^2}{2}$ (plg. 41 pav.).

Kai kūnas metamas vertikaliai arba paleidžiamas laisvai kristi, koordinačių ašį patogu nukreipti žemyn (42 pav.). Tuomet jo judėjimo dėsniai užrašomi taip: $v = v_0 + gt$, $s = v_0 t + \frac{gt^2}{2}$ ir $y = y_0 + v_0 t + \frac{gt^2}{2}$. Jei koordinačių pradžia yra

Žemės paviršiaus taškas, pradinė koordinatė yra neigiama ($y_0 = -h_0$).



42 pav.

Pradiniu greičiu $\vec{v}_0$ kampu α į horizontą mestas kūnas juda parabole (žr. 43 pav.). Šį judėjimą galima išskaidyti į du: x ašies kryptimi judėjimas yra tolyginis ($v_{0x} = v_{1x} = v_2 = v_{3x} = v_{4x}$ – horizontaliosios greičių dedamosios) ir y ašies kryptimi – tolygiai kintamas pagreičiu $\vec{g}$ (analogiška vertikaliai mesto kūno judėjimui: kylant vertikaliosios greičių dedamosios mažėja, leidžiantis – didėja). Kūno greičio kryptis kiekviename trajektorijos taške sutampa su parabolės liestine, o pagreitis $\vec{g}$ nukreiptas žemyn. Judėjimo lygtis x ašies atžvilgiu yra viena: $s_x = v_{0x}t$, o y ašies atžvilgiu – keturios:

$$v_y = v_{0y} + g_y t;\; s_y = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2};\; y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2};\; s_y = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{2g_y}.$$

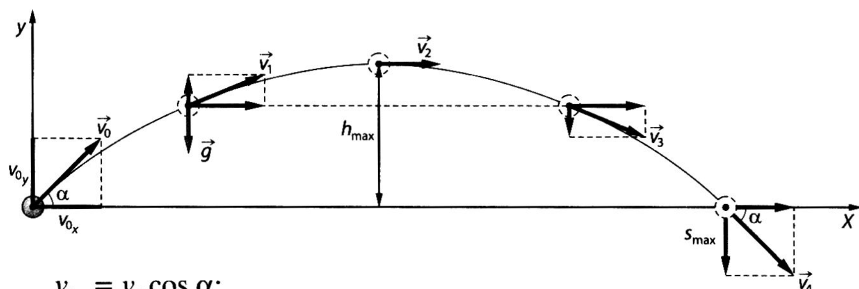
Pasinaudojant šiomis lygtimis galima apskaičiuoti: greitį v bet kuriame trajektorijos taške, kilimo laiką t_1, visą skrydžio laiką t, pakilimo aukštį h_{max}, lėkimo nuotolį s_{max}:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \text{ ir } \operatorname{tg}\alpha = \frac{v_y}{v_x}.$$

$v_y = v_{0y} + g_y t$. Aukščiausiame taške $v_{2y} = 0$, $0 = v_0 sin\,\alpha - gt_1$;

$$t_1 = \frac{v_0 \sin\alpha}{g};\; t = 2t_1 = \frac{2v_0 \sin\alpha}{g}.$$

$$s_y = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{2g_y};\; s_y = h_{max} = \frac{0 - v_0^2 \sin^2\alpha}{-2g} = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}.$$



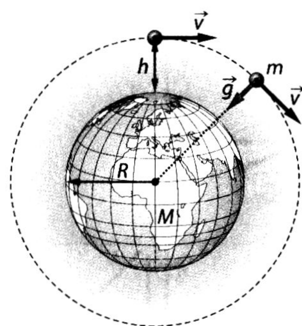
$v_{0x} = v_0 \cos\alpha;$
$v_{0y} = v_0 \sin\alpha;$

43 pav.

$s_x = v_{0x}t$; $s_x = s_{max} = v_0(\cos\alpha)t = \frac{2v_0^2 \sin\alpha \cdot \cos\alpha}{g}$. Iš šios formulės matyti, kad toliausiai kūnas lėks mestas 45° kampu į horizontą, o į tą pačią vietą nukris išmestas dviem kampais, kurių suma lygi 90° (oro pasipriešinimo nepaisome).

Horizontaliai mestas kūnas juda pusės parabolės trajektorija, o jo judėjimui apibūdinti tinka tos pačios savybės ir lygtys, kaip ir kampu į horizontą mesto kūno (43 pav. brėžinyje – iš parabolės viršūnės $y_0 = h_0 = h_{max}$ pradiniu greičiu $\vec{v}_2$).

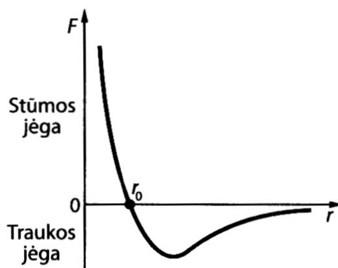
Kai horizontaliai metamo kūno pradinis greitis pakankamai didelis, reikia atsižvelgti į tai, kad Žemės paviršius yra ne plokštuma, bet sfera. Tada šio judėjimo nebegalima laikyti tolygiai kintamu, nes kinta $\vec{g}$ kryptis (ji statmena Žemės paviršiui). Suteikus tam tikrą pradinį greitį horizontalia kryptimi, kūnas, laisvai krisdamas, lieka pradiniame aukštyje dėl Žemės paviršiaus kreivumo. Kūnas tolygiai juda (skrieja) apie Žemę apskritimu (44 pav.). Šio judėjimo įcentrinis pagreitis yra laisvojo kritimo pagreitis: $a_{įc} = g$; $\frac{v^2}{R+h} = G\frac{M}{(R+h)^2}$. Iš čia $v = \sqrt{G\frac{M}{R+h}}$ arba $v = \sqrt{g_h(R+h)}$. Šis greitis vadinamas **pirmuoju kosminiu greičiu**. Nepamirškime, kad $g_h = G\frac{M}{(R+h)^2}$, todėl pirmasis kosminis greitis gali būti apskaičiuojamas ir pagal tokią formulę: $v = \sqrt{G\frac{M}{R+h}} = \sqrt{G\frac{M}{R+h}\cdot\frac{R^2}{R^2}} = \sqrt{g\frac{R^2}{R+h}} = R\cdot\sqrt{\frac{g}{R+h}}$. Norint, kad kūnas skrietų apie Žemę netoli jos paviršiaus ($h << R$, tada g = 9,81 m/s²), reikia jam suteikti horizontalų greitį $v = \sqrt{gR} \approx 8\,\frac{\text{km}}{\text{s}}$.



44 pav.

Elektromagnetinės prigimties sąveika. Kita kūnų sąveikos priežastis yra pakitimai pačiuose kūnuose dėl jų sąveikos. Kiekvienas kūnas sudarytas iš dalelių (molekulių, atomų). Gravitacinė šių dalelių sąveika yra labai silpna ir negali nulemti tų kūnų savybių. Nors normaliomis sąlygomis molekulės ir atomai elektriškai neutralūs, jų tarpusavio sąveika yra elektromagnetinė.

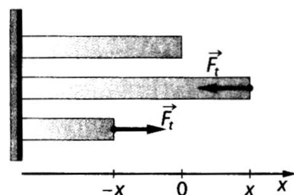
Kiekvienas atomas sudarytas iš teigiamo branduolio ir apie jį skriejančių neigiamų elektronų. Dėl šių dalelių sąveikos molekulės (jų atomai) tuo pačiu metu vienos kitas traukia ir stumia. Atstumui didėjant, šios sąveikos silpnėja. Be to, stūmos ir traukos jėgos praktiškai vienodos, nes teigiamų ir neigiamų dalelių išsidėstymo skirtumas, lyginant su atstumu tarp molekulių, labai mažas. Kai molekulės yra greta viena kitos, šis išsidėstymo skirtumas lemia skirtingą trauką ir stūmą. Molekulių sąveikos (traukos ir stūmos jėgų atstojamosios) priklausomybė nuo atstumo tarp jų yra sudėtinga. Ją galima pavaizduoti grafiškai (žr. 45 pav.).



45 pav.

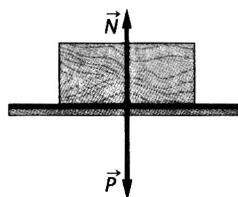
Esant atstumui $r = r_0$ molekulių sąveikos jėga lygi nuliui, nes molekulės vienodai traukia ir stumia viena kitą. Kai $r < r_0$, molekulės stumia, kai $r > r_0$ – traukia viena kitą. Kai r didesnis už r_0 keletą kartų, molekulių sąveikos jėga apytikriai lygi nuliui (jos praktiškai nebeveikia viena kitos).

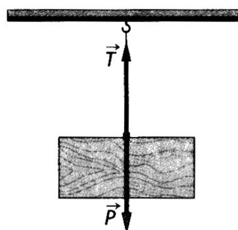
Deformuotas (ištemptas arba suspaustas) tamprus kūnas stengiasi atgauti savo formą dėl pakitusios dalelių tarpusavio padėties ir veikia jį deformavusius kūnus (46 pav.). Šis veikimas priklauso nuo kūno savybių ir deformacijos laipsnio. Deformuoto tampraus kūno veikimą nusako tamprumo jėga. $F_{tx} = -kx$. Tai **Huko dėsnis**: deformuoto kūno tamprumo jėga proporcinga kūno deformacijos laipsniui ir nukreipta priešingai deformuoto kūno dalelių poslinkiui kitų dalelių atžvilgiu. x – deformaciją apibūdinantis dydis (kūno galo koordinatė po deformacijos), k – nuo medžiagos rūšies, kūno matmenų ir formos priklausančią kūno savybę apibūdinantis dydis – tamprumo (standumo) koeficientas, SI vienetų sistemoje matuojamas niutonais metrui (N/m).



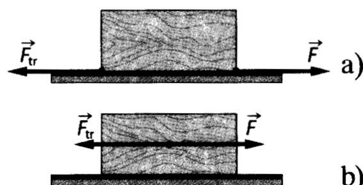
46 pav.

Ant atramos padėtas arba ant pakabos pakabintas kūnas deformuoja atramą arba pakabą, nes Žemė jį traukia žemyn (47 pav. *a*, *b*). Todėl atrama arba pakaba veikia šį kūną tamprumo jėga, kuri vadinama reakcijos jėga ($\vec{N}$ arba $\vec{T}$). Jėga, kuria kūnas veikia atramą arba pakabą, vadinama **kūno svoriu** ($\vec{P}$). Svoris matuojamas niutonais (N). Jeigu kūnas ir atrama arba pakaba nejuda, tai $\vec{P} = m\vec{g}$.





47 pav.



48 pav.

Kūno atramai (pakabai) ir kūnui judant su pagreičiu, svoris $\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$: 1) jeigu $\vec{a}$ ir $\vec{g}$ priešingų krypčių ($\vec{a} \uparrow\downarrow \vec{g}$), kūno svoris didėja (atsiranda perkrova); 2) jeigu $\vec{a}$ ir $\vec{g}$ tų pačių krypčių ($\vec{a} \downarrow\downarrow \vec{g}$), kūno svoris mažėja; 3) jeigu kūnas ir atrama (pakaba) laisvai krenta ($\vec{a} = \vec{g}$), kūnas yra nesvarus ir $P = 0$.

Judantį arba verčiamą judėti kito kūno paviršiumi kūną šis veikia priešinga judėjimui kryptimi (48 pav. *a*, *b*). Toks veikimas išreiškiamas **trinties jėga** F_{tr}. Ji atsiranda dėl kūnų paviršių nelygumų arba kūnų sulipimo (molekulių traukos), jeigu paviršiai labai lygūs. Iškilimuose esančios dalelės užkliuvusios pasislenka ir yra verčiamos grįžti atgal. Trinties sąveika skirstoma į rimties ir judėjimo trintį. Judėjimo trintis dar skirstoma į slydimo ir riedėjimo trintį. Rimties trintis veikia verčiamą judėti, bet nejudantį kūną. Rimties trinties jėgos modulis lygus verčiančių kūną judėti jėgų atstojamosios moduliui; kitaip tariant, $F_{tr} = F$. Didėjant F, didės ir F_{tr}. Pasiekus tam tikrą F_{tr} vertę, kūnas pradeda slysti, ir jo paviršių veikia slydimo trinties jėga, truputį mažesnė už didžiausią rimties trinties jėgą. Taigi tolygiai slystantį kūną reikia veikti truputį silpniau negu norint jį išjudinti. Maksimali rimties trinties jėga priklauso nuo besiliečiančių paviršių ir kūnų prispaudimo vienas prie kito. Kuo didesnis kūnų prispaudimas, tuo didesnė reakcijos jėga, todėl $F_{tr\,max} = \mu N$. μ – kūnų paviršius charakterizuojantis dydis – trinties koeficientas, kuris neturi matavimo vienetų. Kadangi $F_{tr\,sl} \approx F_{tr\,max}$, tai $F_{tr\,sl} \approx \mu N$. Kai vienas kūnas rieda kito paviršiumi, nelygumai nesukimba; tačiau atsiranda pasipriešinimas riedėjimui dėl to, kad riedantis kūnas truputį deformuoja (įspaudžia) paviršių, kuriuo rieda, ir tarsi visą laiką rieda į kalniuką. Kuo mažesnis kūno riedamojo paviršiaus kreivumo spindulys ir kuo didesnis prispaudimas (reakcija), tuo didesnis pasipriešinimas riedėjimui. Riedėjimo trinties

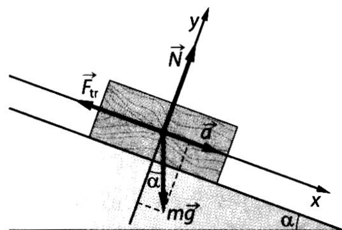
jėga $F_{tr} = k\frac{N}{R}$; čia k – riedėjimo trinties koeficientas, kuris, priešingai nei slydimo (arba rimties) trinties koeficientas, turi matavimo vienetą – metrą (m). Siekiant sumažinti judėjimo trintį, tarp slystančių kūnų įterpiama alyva arba slydimas keičiamas riedėjimu. Skystyje arba dujose judantis kūnas taip pat stabdomas. Pasipriešinimo judėjimui skystyje arba dujose jėga priklauso nuo kūno paviršiaus formos, skysčio arba dujų tankio ir kūno judėjimo greičio. Skirtingai nei kietojo kūno paviršiuje, judant skystyje arba dujose neegzistuoja rimties pasipriešinimo jėga.

Žemės traukiami viršutiniai skysčio arba dujų sluoksniai slegia žemiau esantį skystį arba dujas, todėl žemesniuose taškuose slėgis didesnis. Skysčio sluoksnio slėgis $p = \rho gh$; čia h – skysčio sluoksnio storis. Dujų sluoksnio slėgiui apskaičiuoti ši formulė netaikoma, nes dujų tankis ρ įvairiose vietose yra nevienodas. Kadangi skystyje arba dujose esantį kūną šių medžiagų molekulės iš apačios slegia stipriau negu iš viršaus, tai kūnas yra stumiamas į viršų jėga, kuri vadinama **Archimedo jėga**. Jos modulis lygus panardinto kūno išstumto skysčio (dujų) svoriui: $F_A = P_{sk} = m_{sk}g = \rho_{sk}Vg$.

Išvados: 1) jeigu $F_A < F_S$ ($\rho_{sk} < \rho_k$), tai kūnas skystyje (dujose) skęsta; 2) jeigu $F_A = F_S$ ($\rho_{sk} = \rho_k$), tai kūnas yra pusiausviras; 3) jeigu $F_A > F_S$ ($\rho_{sk} > \rho_k$), tai kūnas kyla į viršų, kol išnyrant iš skysčio (mažėjant panirusios dalies tūriui) Archimedo jėga tampa lygi sunkio jėgai.

Paprastai judantį kūną vienu metu veikia kelios jėgos, todėl uždaviniai dažniausiai sprendžiami tokia tvarka: 1) išsiaiškinama, kokios jėgos veikia kūną; 2) nubraižomas brėžinys, pažymimos koordinačių ašys (arba viena ašis); 3) randamos jėgų projekcijos koordinačių ašyse; 4) jėgų projekcijos sudedamos algebriškai; 5) uždavinys sprendžiamas remiantis Niutono dėsniais.

Pavyzdžiui (49 pav.), nuožulniąja plokštuma, kurios polinkio kampas α, juda m masės tašelis, kurio trinties į plokštumą koeficientas μ. Tašelį (jo masės centrą) veikia trys jėgos: sunkio jėga $m\vec{g}$, atramos reakcijos jėga $\vec{N}$ ir trinties jėga $\vec{F}_{tr}$. Tų jėgų kryptys parodytos brėžinyje. Veikdamos kartu, jos suteikia tašeliui pagreitį $\vec{a}$, nukreiptą išilgai tašelio žemyn. Koordinačių ašį x nukreipkime išilgai nuožulniosios plokštumos ir ašį



49 pav.

y statmenai jai. Antrasis Niutono dėsnis vektoriškai užrašomas taip: $m\vec{g}+\vec{N}+\vec{F}_{tr}=m\vec{a}$. Surandame visų vektorių projekcijas x ir y ašyse: $(mg)_x = mg \sin\alpha$ ir $(mg)_y = -mg\cos\alpha$; $N_x = 0$ ir $N_y = N$; $F_{tr\,x} = -F_{tr} = -\mu N$ ir $F_{tr\,y} = 0$; $a_x = a$ ir $a_y = 0$.

Antrasis Niutono dėsnis, siejantis vektorių projekcijas x ašyje: $mg\sin\alpha - F_{tr} = ma$ arba $mg\sin\alpha - \mu N = ma$ ir y ašyje: $N - mg\cos\alpha = 0$ arba $N = mg\cos\alpha$. Sujungę x ir y paskutines lygtis, gauname: $a = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)$. Kaip matyti, tašelio pagreitis a mažesnis už laisvojo kritimo pagreitį g, dėl to (kad sumažina kritimo arba kilimo pagreitį g) praktikoje ir naudojamos nuožulniosios plokštumos.

Jeigu kūnas nuožulniąja plokštuma neslysta arba slysta tolygiai ($a = 0$), kūną veikiančių jėgų atstojamoji lygi nuliui, todėl $\sin\alpha - \mu\cos\alpha = 0$ arba $\mathrm{tg}\alpha = \mu$.

3.3. Tvermės dėsniai mechanikoje

3.3.1. Judesio kiekis, jėgos impulsas

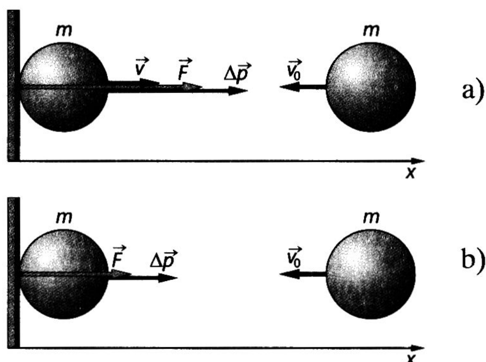
Antrojo Niutono dėsnio formulę $\vec{F}=m\vec{a}$, įstačius pagreičio išraišką $\vec{a}=\frac{\vec{v}-\vec{v}_0}{t}$, galima užrašyti taip: $\vec{F}=m\frac{\vec{v}-\vec{v}_0}{t}$; $\vec{F}t=m\vec{v}-m\vec{v}_0$ arba $\vec{F}\Delta t=m\Delta\vec{v}$.

Kūno masės ir jo greičio sandauga vadinama **judesio kiekiu** arba **kūno impulsu**: $\vec{p}=m\vec{v}$. Tai judantį kūną apibūdinantis vektorinis dydis, kurio kryptis sutampa su kūno greičio kryptimi, todėl judesio kiekiai sudedami ir atimami remiantis veiksmų su vektoriais taisyklėmis. Iš formulės matyti, jog $[mv] = 1$ kg · m/s.

Poveikis kūnui apibūdinamas fizikiniu dydžiu $\vec{F}t$ – **jėgos impulsu**, kuris lygus kūno impulso pokyčiui $\Delta\vec{p}$. Smūgio metu kūną veikiančios jėgos kryptis sutampa su kūno impulso pokyčio kryptimi. Jėgos impulsas matuojamas niutonsekundėmis, kitaip tariant, $[Ft] = 1$ N · s.

$\vec{F}\Delta t=\Delta\vec{p}$; čia $\Delta\vec{p}$ – judesio kiekio pokytis. Jei kūno smūgis į sieną tamprus, tai $\vec{v}=-\vec{v}_0$, o $v = v_0$. $\vec{F}t=m\vec{v}-m\vec{v}_0$ arba $Ft = mv - (-mv_0) = 2mv$ (50 pav., *a*).

Jeigu kūno smūgis į sieną plastinis (kūnas prilimpa prie sienos), tai $v = 0$ ir $Ft = 0 - (-mv_0) = mv_0$ (50 pav., *b*).



50 pav.

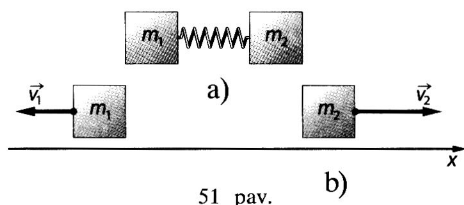
Uždaroji kūnų sistema – tai grupė kūnų, kurie sąveikauja tarpusavyje nesąveikaudami su išoriniais kūnais. Realiame fiziniame pasaulyje nėra visiškai izoliuotų kūnų, bet grupę, kurią sudarančių kūnų tarpusavio sąveika yra daug stipresnė negu jų sąveika su kitais kūnais, galima laikyti izoliuota (uždara). Pavyzdžiui, du ledo rituliai slysta ledu beveik be trinties ir susiduria vienas su kitu. Rituliai su kitais kūnais sąveikauja labai silpnai. Žemės trauką kompensuoja ledo paviršiaus reakcija į spaudimą. Šiek tiek stipriau veikia trintis, bet ji daug silpnesnė už ritulių sąveiką susiduriant, todėl ritulius galima laikyti uždara sistema.

Jei kūnų grupė sudaro uždarą sistemą, tai šią sistemą veikianti atstojamoji jėga lygi nuliui. Kadangi $\vec{F}=0$, tai iš $\vec{F}\Delta t=\Delta\vec{p}$ lygybės galima spręsti, kad judesio kiekis ilgainiui nekinta, kitaip tariant, $\vec{p}=const$. Ši svarbi išvada – **judesio kiekio tvermės dėsnis**: uždaros sistemos kūnų judesio kiekių suma sąveikos metu nekinta:

$$m_1\vec{v}_{01}+m_2\vec{v}_{02}+...+m_N\vec{v}_{0N}=m_1\vec{v}_1+m_2\vec{v}_2+...+m_N\vec{v}_N$$ arba

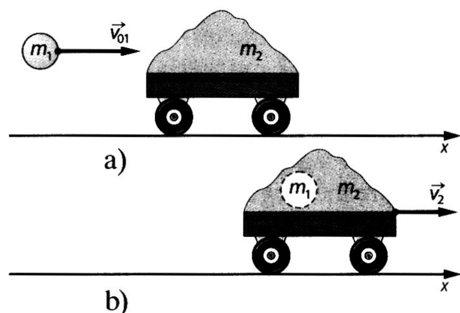
$$\vec{p}_{01}+\vec{p}_{02}+...+\vec{p}_{0N}=\vec{p}_1+\vec{p}_2+...+\vec{p}_N.$$

Tokios sistemos yra šautuvas ir kulka jo vamzdyje, patranka ir sviedinys, raketos apvalkalas ir kuras jo viduje, Saulė ir planetos, planetos ir jų palydovai. Kiekvieną kartą, kai dėl tarpusavio sąveikos pakinta kurio nors sistemos kūno judesio kiekis, būtinai pakinta ir kitų kūnų judesio kiekiai. Be to, jie pasikeičia taip, kad bendras visų kūnų judesio kiekis lieka toks pat. Šis dėsnis galioja ne tik klasikinėms sistemoms, bet ir kvantinės mechanikos reiškiniams.



51 pav.

Tarkime, kad du kūnai, kurių masės m_1 ir m_2, sujungti suspausta spyruokle, nejuda (51 pav., *a*). Kaip ir kitais tokiais atvejais, spyruoklės masės nepaisome. Bendras sistemos judesio kiekis lygus nuliui ir pagal tvermės dėsnį jis visą laiką turi būti lygus nuliui. Atleidus spyruoklę, kūnai atšoks vienas nuo kito greičiais $\vec{v}_1$ ir $\vec{v}_2$ (51 pav., *b*). Taigi (spyruoklė suspausta) $0 = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2$ (spyruoklė atleista), arba suprojektavus vektorius: $m_1v_1 - m_2v_2 = 0$.

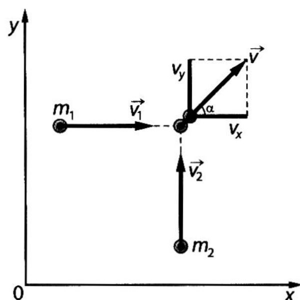


52 pav.

Judesio kiekio tvermės dėsnis galioja ne tik tampriems smūgiams, bet ir plastiniams (netampriems, kai po sąveikos kūnai sukimba). Tarkime, kad pabūklo sviedinys, kurio masė m_1, skriejęs greičiu $\vec{v}_{01}$ lygiagrečiai su bėgiais, atsimušė į nejudančią platformą $(\vec{v}_{02} = 0)$ su smėliu, kurios masė m_2 ir įstrigo smėlyje (52 pav., *a*). Sviedinys, patekęs į smėlį, perduoda platformai su smėliu savo judesio kiekį, todėl platforma su įstrigusiu sviediniu pajuda bėgiais greičiu $\vec{v}_2$ (52 pav., *b*). Judesio kiekio tvermės dėsnis šiuo atveju:

$$m_1\vec{v}_{01} = (m_1 + m_2)\vec{v}_2 \text{ arba } m_1v_{01} = (m_1 + m_2)v_2.$$

Judesio kiekio tvermės dėsnis taikomas dviems kūnams, judantiems plokštumoje ir erdvėje. Pavyzdžiui: dalelės, kurių masė m_1 ir m_2, o greičiai $\vec{v}_1$ ir $\vec{v}_2$, juda statmenai viena kitos atžvilgiu (53 pav.). Netampriai susidūrusios, jos juda kartu. Norėdami apskaičiuoti dalelių greitį po susidūrimo, taikome judesio kiekio tvermės dėsnį:



53 pav.

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v};$$

čia $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2$ – dalelių judesio kiekiai prieš sąveiką, o $(m_1 + m_2)\vec{v}$ – dalelių judesio kiekiai po sąveikos.

Judesio kiekio tvermės dėsnis kiekvienai dedamajai x ir y ašyse:

$$m_1 v_{1x} = (m_1 + m_2)v_x \text{ ir } m_2 v_{2y} = (m_1 + m_2)v_y;$$

$$m_1 v_{1x} = m_1 v_1 \text{ ir } m_2 v_{2y} = m_2 v_2.$$

Pagal Pitagoro teoremą:

$$[(m_1 + m_2)v]^2 = [(m_1 + m_2)v_x]^2 + \left[(m_1 + m_2)v_y\right]^2.$$

Atlikus pakeitimus: $[(m_1 + m_2)v]^2 = (m_1 v_1)^2 + (m_2 v_2)^2$; iš čia

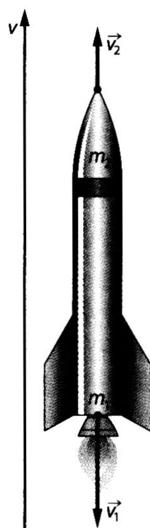
$$v = \frac{\sqrt{(m_1 v_1)^2 + (m_2 v_2)^2}}{m_1 + m_2}, \text{ o } \operatorname{tg}\alpha = \frac{(m_1 + m_2)v_y}{(m_1 + m_2)v_x}, \text{ arba } \operatorname{tg}\alpha = \frac{m_2 v_{2y}}{m_1 v_{1x}},$$

arba $\operatorname{tg}\alpha = \dfrac{m_2 v_2}{m_1 v_1}$.

Įdomus ir svarbus judesio kiekio tvermės dėsnio pritaikymo praktikoje atvejis yra **reaktyvinis judėjimas**. Taip vadinamas kūno judėjimas, kai nuo jo tam tikru greičiu atsiskiria kuri nors dalis. Tipiškas reaktyvinio judėjimo pavyzdys yra raketų judėjimas.

Raketa – dviejų sąveikaujančių kūnų sistema (žr. 54 pav.). Priekinėje raketos dalyje yra naudingasis krovinys: specialūs įtaisai, moksliniai prietaisai, kosmonautai. Tolesnėje raketos dalyje būna kuro atsarga ir įvairios valdymo sistemos. Kuras tiekiamas į degimo kamerą, kurioje jis sudega ir virsta aukštos temperatūros bei didelio slėgio dujomis. Pro antgalį, vadinamą reaktyvine tūta, dujos veržiasi į išorę, sudarydamos reaktyvinę čiurkšlę. Tūtos paskirtis – padidinti čiurkšlės greitį. Degimo kameroje esančios dujos ir likusioji raketos dalis sudaro dviejų sąveikaujančių kūnų sistemą. Dujos yra atsiskirianti kūno – raketos – dalis.

Prieš startą raketos judesio kiekis Žemės atžvilgiu lygus nuliui. Degimo kameroje esančios dujos sąveikauja su kita raketos dalimi ir besiverždamos pro tūtą įgyja tam tikrą judesio kiekį. Kol kas tarkime, kad Žemės traukos jėga neveikia. Tuomet raketa yra uždara sistema, ir bendras jos judesio kiekis po paleidimo turi būti lygus nuliui. Todėl raketos apvalkalas ir visa, kas jame yra, įgyja judesio kiekį, kurio modulis lygus dujų judesio kiekio moduliui, o kryptis priešinga tam judesio kiekiui. Remiantis impulso tvermės dėsniu randamas raketos greitis. Tarkime, kad visos dujos, susidariusios degant kurui, išmetamos iš



54 pav.

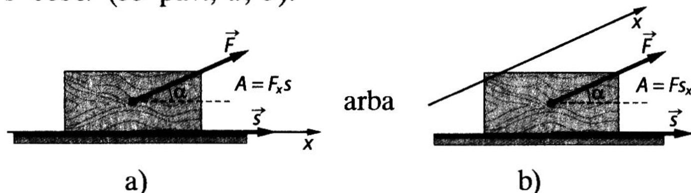
raketos ne laipsniškai, bet iš karto. Pažymėkime dujų, kuriomis raketoje virsta kuras, masę m_1, o išlekiančių dujų greitį $\vec{v}_1$. Apvalkalo masę ir greitį pažymėkime m_2 ir $\vec{v}_2$. Koordinačių ašį nukreipkime apvalkalo judėjimo kryptimi (54 pav.). Tuomet dujų ir apvalkalo greičių projekcijų moduliai bus lygūs vektorių $\vec{v}_1$ ir $\vec{v}_2$ moduliams, o jų ženklai bus priešingi.

$0 = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2$, $m_1v_1 - m_2v_2 = 0$, $m_1v_1 = m_2v_2$. Iš čia randame raketos greitį: $v_2 = \frac{m_1v_1}{m_2}$.

Matyti, kad raketos greitis tiesiogiai priklauso nuo dujų išmetimo greičio ir kuro bei apvalkalo masės santykio.

3.3.2. Mechaninis darbas, galia ir energija

Reiškinys, kurio metu vienas kūnas, veikdamas kitą kūną, priverčia jį judėti arba stabdo (trukdo), vadinamas **mechaniniu darbu**. Šis reiškinys apibūdinamas skaliariniu fizikiniu dydžiu, kuris taip pat vadinamas darbu. Jis žymimas raide A, SI vienetų sistemoje matuojamas džauliais (J). Mechaniniu darbu A laikome jėgos $\vec{F}$, nusakančios, kaip veikia darbą atliekantis kūnas, ir veikiamo kūno poslinkio $\vec{s}$ skaliarinę sandaugą: $A = \vec{F} \cdot \vec{s}$. Iš skaliarinės sandaugos apibrėžimo matyti, kad darbas lygus veikiančios jėgos ir atlikto poslinkio modulių bei kampo tarp šių vektorių kosinuso sandaugai. $A = F \cdot s \cdot \cos\alpha$ (55 pav., *a*, *b*).



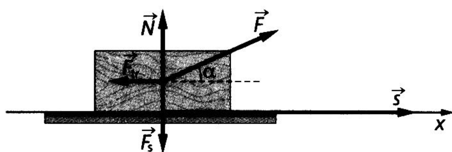
55 pav.

Darbas, kurį atliko kūnas, veikdamas kitą kūną 1 N jėga ir priversdamas pasislinkti 1 m jėgos veikimo kryptimi, lygus 1 J: 1 J = = 1 N · 1 m.

Jeigu judantį kūną tuo pačiu metu veikia keli kūnai, tai bendras jų atliktas darbas lygus atskirų kūnų atliktų darbų sumai: $A = A_1 + + A_2 + A_3 + A_4$.

Tempiančiojo kūno darbas $A_1 = F \cdot s \cdot \cos\alpha$. Žemės (sunkio jėgos) darbas $A_2 = F_s \cdot s \cdot \cos 90° = 0$. Paviršiaus reakcijos darbas $A_3 =$

$= N \cdot s \cdot \cos 90° = 0$. Paviršiaus nelygumų (trinties) darbas $A_4 = F_{tr} \cdot s \cdot \cos 180° = -F_{tr}s$ (žr. 56 pav.).



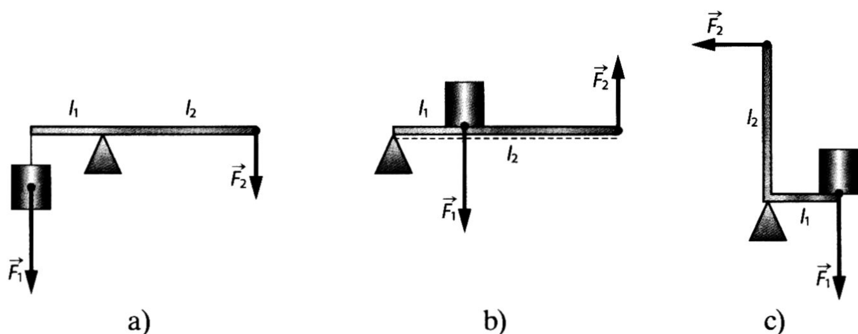
56 pav.

Išvados: 1) Tas, kas priverčia kūną judėti, atlieka teigiamą darbą. A > 0, kai $F_x > 0$ arba $0 \leq \alpha < 90°$. $A_{max} = F \cdot s$, kai $\alpha = 0$. Metus kūną vertikaliai žemyn, sunkio jėga $F_s = mg$ atlieka teigiamą darbą: $A_1 = mgh$ (čia h – kūno kritimo aukštis). Jei išorinės jėgos kelia kūną pastoviu greičiu aukštyn, jų atliktas darbas taip pat yra teigiamas: $A_{iš} = mgh$ (jėgos ir poslinkio kryptys sutampa).

2) Tas, kas trukdo kūnui judėti, atlieka neigiamą darbą. $A < 0$, kai $F_x < 0$ arba $90° < \alpha \leq 180°$ ($\vec{F}_{tr}$ – trinties jėga – visada atlieka neigiamą darbą). Metus kūną vertikaliai aukštyn, sunkio jėga atlieka neigiamą darbą: $A_2 = -mgh$ (čia h – kūno pakilimo aukštis). Jei išorinės jėgos leidžia kūną pastoviu greičiu žemyn, jų atliktas darbas irgi yra neigiamas: $A_{iš} = -mgh$ (jėgos ir poslinkio kryptys priešingos).

3) Kūnas, veikiantis statmenai judėjimo krypčiai, darbo neatlieka. $A = 0$, kai $F_x = 0$ arba $\alpha = 90°$ ($\vec{N}$ – atramos reakcijos jėga ir $\vec{F}_s$ – kūno sunkio jėga, kai kūnas juda horizontaliai, darbo neatlieka). Neatlieka darbo ir jėga, verčianti kūną tolygiai judėti apskritimu (įcentrinė jėga), nes ji nukreipta spinduliu į apskritimo centrą, t. y. kiekvienu momentu statmena kūno judėjimo krypčiai. Pavyzdžiui, neatlieka darbo siūlo, prie kurio pririštas tolygiai apskritimu judantis kūnas, įtempimo jėga, taip pat visuotinės traukos (gravitacijos) jėga, kurios veikiami dirbtiniai Žemės palydovai skrieja apskritimine orbita. Darbas neatliekamas, jeigu jėgos veikiamas kūnas nepajuda (nėra poslinkio). Bet kokia jėga, nejudamai slegianti pamatus, atramas, tempianti pakabas, darbo neatlieka.

Naudodamas tam tikrus mechanizmus, žmogus gali pakeisti savo veikimą ir kartu palengvinti darbo atlikimą. Tačiau **auksinė mechanikos taisyklė** sako, kad idealiu atveju (kai nėra trinties tarp mechanizmo detalių, o jų masės lygios nuliui) kiek kartų mechanizmo dėka laimima jėgos, tiek pat kartų pralaimima kelio. Todėl darbas atliekamas toks pat, nežiūrint mechanizmo panaudojimo. Naudojant mechanizmą, realiai be reikalingo darbo atliekamas dar papildomas (priverčiant mechanizmą judėti, nugalint jo detalių trintį).



57 pav.

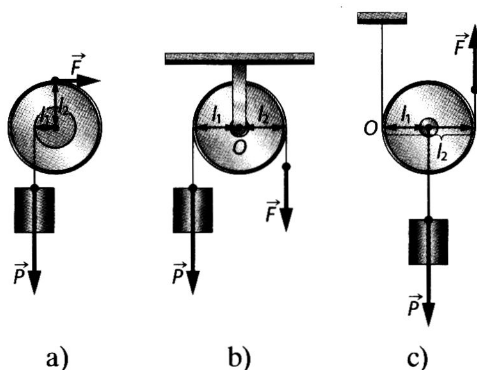
Pavyzdžiui, iškeliant vandenį iš šulinio (naudingas darbas) reikia kelti ir kibirą (nenaudingas darbas). Kiekvieno mechanizmo naudojimo efektyvumą parodo naudingo (A_n) ir viso atlikto (A_v) darbo santykis, vadinamas naudingumo koeficientu (žymimas η „eta“): $\eta = \frac{A_n}{A_v}$ arba $\eta = \frac{A_n}{A_v} \cdot 100\,\%$. Tai dydis, neturintis matavimo vienetų. Naudingumo koeficientas niekada negali būti didesnis už vienetą (arba 100 %).

Yra dviejų rūšių **paprastieji mechanizmai**: svertas ir nuožulnioji plokštuma. Kiekvienos rūšies mechanizmai skirstomi į du porūšius. Sverto porūšiai yra skridinys ir suktuvas, nuožulniosios plokštumos – pleištas ir sraigtas.

Svertas – tai kietas kūnas, turintis sukimosi ašį (atramos tašką) (57 pav., *a*, *b*, *c*).

Iš jėgos momentų taisyklės aišku, kad idealus svertas yra pusiausviras (nesisuka arba sukasi tolygiai), kai $F_1 l_1 = F_2 l_2$; iš čia $F_2 = F_1 \frac{l_1}{l_2}$. Svertu laimime jėgos tiek kartų, kiek kartų sverto ilgasis petys ilgesnis už trumpąjį, tačiau tiek pat kartų pralaimime kelio ($A_n = A_v$). Realiai su svertu atlikdami darbą turėsime jį veikti didesne jėga nei F_2.

Suktuvas – tai dviejų skirtingo skersmens velenų, turinčių bendrą sukimosi ašį, sistema (58 pav., *a*). Suktuvas – taip pat svertas, kuriam taikoma momentų taisyklė: $Pl_1 = Fl_2$. Kai yra trintis (naudojama $F_2 > F$), tai $A_n = Ps_1 = P2\pi \cdot l_1$ ir $A_v = F_2 s_2 = F_2 2\pi \cdot l_2$; $\eta = \frac{Pl_1}{F_2 l_2}$.



58 pav.

Skridinys – tai ant ašies užmautas ratas su grioveliu virvei ar lynui permesti. Skridiniai yra dviejų rūšių: nekilnojamieji (58 pav., *b*) ir kilnojamieji (58 pav., *c*). Nekilnojamasis skridinys (ašis įtvirtinta) – lygiapetis svertas ($l_1 = l_2$). Idealiu skridiniu jėgos nelaimime – juo tik keičiama jėgos veikimo kryptis, o tai labai patogu: $Pl_1 = Fl_2$; $F = P$. Realiu – jėgos pralaimime.

Kilnojamasis skridinys (ašis gali kilti ar leistis) – vienpusis svertas (abi jėgos veikia iš vienos pusės nuo sukimosi ašies O). Idealiu skridiniu jėgos laimima dvigubai, kelio tiek pat kartų pralaimima:

$$Pl_1 = Fl_2;\ 2l_1 = l_2;\ F = \frac{P}{2}.$$

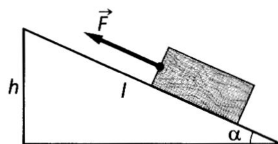
Realiu skridiniu jėgos laimima mažiau negu du kartus.

Dažniausiai naudojama dviejų – kilnojamojo ir nekilnojamojo – skridinių sistema, vadinama skrysčiais. Jais keičiama jėgos veikimo kryptis. Jei kilnojamųjų skridinių yra n, tai jėgos laimima $2n$ kartų (idealiu atveju), tiek pat kartų pralaimima kelio.

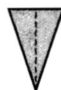
Plokštuma, sudaranti kampą su horizontu, vadinama **nuožulniąja plokštuma** (59 pav.).

$A_n = Ph$; $A_v = Fl$; čia P – sunkaus, nepakeliamo trumpiausiu keliu į aukštį h kūno svoris, F – kūnui užtempti per nuožulniąją plokštumą panaudota jėga, l – nuožulniosios plokštumos ilgis, α – nuožulnumo kampas. Šiuo atveju $\eta = \frac{Ph}{Fl}$.

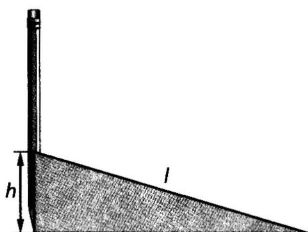
Pleištas – tai dviejų nuožulniųjų plokštumų sistema (60 pav.).



59 pav.



60 pav.



61 pav.

Iš popieriaus iškirpę statųjį trikampį ir užvyniodę jį ant pieštuko, gautume sriegio modelį. Vadinasi, sraigtiniai laiptai – tai susukta nuožulnioji plokštuma (61 pav.).

Dydis, apibūdinantis darbo atlikimo greitį (spartą), vadinamas **galia** ir žymimas raide N. Mašinų bei mechanizmų galios skaitinė vertė lygi darbui, atliktam per laiko vienetą: $N = \frac{A}{t}$. Galia – skaliarinis fizikinis dydis, matuojamas vatais (W). Vieno vato galios mechanizmas per 1 s atlieka 1 J darbą: $1\ \mathrm{W} = 1\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}$.

Kai galia žinoma, darbas apskaičiuojamas pagal formulę: $A = N \cdot t$. Taikant šią formulę galima gauti dar vieną darbo (energijos) vienetą – vatsekundę (W · s): 1 J = 1 W · s. Dažnai vartojami stambesni darbo ir energijos vienetai – kilovatvalandė (kWh) ir megavatvalandė (MWh):

$1\ \mathrm{kWh} = 1000\ \mathrm{W} \cdot 3600\ \mathrm{s} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \mathrm{J}$ ir $1\ \mathrm{MWh} = 10^9\ \mathrm{W} \times 3600\ \mathrm{s} = 3{,}6 \cdot 10^9\ \mathrm{J}$.

Kūną arba kūnų (objektų) sistemą apibūdina skaliarinis dydis – **energija**. Kadangi šiuo dydžiu laikome didžiausią darbą, kurį gali atlikti kūnas ar kūnų sistema, todėl ji, kaip ir darbas, matuojama džauliais. Pagal priežastį, dėl kurios gali būti atliekamas darbas, energija skirstoma į mechaninę, šiluminę (vidinę), elektros, šviesos, atominę (branduolinę) ir kt.

Mechaninė energija yra dviejų rūšių: kinetinė ir potencinė. Mechaninė energija priklauso nuo kūnų masių, jų tarpusavio padėties ir judėjimo greičių. Ji lygi kinetinės ir potencinės energijos sumai:

$$E = E_k + E_p.$$

Kinetine energija apibūdinamas judantis kūnas. Darbas, kurį gali atlikti toks kūnas, priklauso nuo jo masės ir judėjimo greičio: $E_k = \frac{mv^2}{2}$. Kūno kinetinė energija nebūna neigiama (v^2, o bet kokį skaičių pakėlus kvadratu atsakymas būna teigiamas). Vadinasi, $E_k \geq 0$.

Du skirtingos masės judantys kūnai turės vienodai kinetinės energijos, kai mažesnės masės kūnas judės didesniu greičiu, o didesnės

masės – mažesniu; kūnų masių santykis atvirkščiai proporcingas jų greičių kvadratų santykiui:

$$m_1 v_1^2 = m_2 v_2^2;\ \frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2^2}{v_1^2} \text{ arba } \frac{m_1}{m_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2.$$

Kinetinė energija taip pat yra reliatyvi, t. y. priklauso nuo pasirinktos atskaitos sistemos. Pavyzdžiui, važiuojančio automobilio kinetinė energija atrodo skirtinga stovinčiam plento pakraštyje stebėtojui ir traukinio, riedančio lygiagrečiu su plentu geležinkeliu, keleiviui. Kinetinės energijos formulėje esantis greitis v yra reliatyvus, dėl to jos vertės skirtingose atskaitos sistemose nevienodos. Taigi reikšmingi tik kinetinės energijos pokyčiai.

Kinetinės energijos teorema teigia, kad kūną veikiančios jėgos arba jėgų atstojamosios darbas lygus kūno kinetinės energijos pokyčiui: $A = E_{k2} - E_{k1}$ arba $A = \Delta E_k$; $A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$.

Išvados: 1) $A > 0$, t. y. jėga atlieka teigiamą darbą, kai kūnas juda jos veikimo kryptimi. Tuomet $\Delta E_k > 0$ arba $E_{k2} > E_{k1}$, t. y. kūno kinetinė energija didėja, nes kūno judėjimo kryptimi veikianti jėga padidina greičio modulį ($v_2 > v_1$).

2) $A < 0$, kai kūnas juda kryptimi, priešinga jėgos veikimo krypčiai; $\Delta E_k < 0$ arba $E_{k2} < E_{k1}$ arba $v_2 < v_1$.

3) $A = 0$, kai kūnas juda horizontaliai pastoviu greičiu; $\Delta E_k = 0$ arba $E_{k2} = E_{k1}$, arba $v_2 = v_1$.

(Traukos jėgos darbas lygus trinties jėgos darbui su minuso ženklu, todėl atstojamasis darbas lygus nuliui.)

Potencinė energija – tai kūnų ar kūno dalių sąveikos energija. Ji yra ne vieną kūną, o kūnų sistemą apibūdinantis dydis. Potencinė energija priklauso nuo sistemos dalių tarpusavio išsidėstymo ir jų padėties kitų kūnų atžvilgiu. Pakėlus kūną, pakinta jo padėtis Žemės atžvilgiu, deformavus – kūno dalių tarpusavio padėtis. Kalbėdami apie kūno potencinę energiją, visada atsižvelgiame į jo sąveiką su kitais kūnais. Taigi potencinės energijos nulinė vertė parenkama laisvai kito kūno ar jų sistemos atžvilgiu. Pakelto į h aukštį virš Žemės m masės kūno potencinė energija $E_p = mgh$. (Ji teigiama – $E_p > 0$, kai nulinis energijos lygmuo yra Žemės paviršiuje.)

Potencinė energija bus neigiama ($E_p < 0$), jei nulinį lygmenį pasirinksime begalybėje. To paties kūno gravitacinės sąveikos su Žeme

potencinė energija $E_p = -G\frac{mM}{r}$; čia G – gravitacijos konstanta, M – Žemės masė, r – atstumas nuo Žemės centro iki kūno.

Laikydami, kad nedeformuotos spyruoklės ($x = 0$) potencinė energija lygi nuliui, randame suspaustos ar ištemptos spyruoklės potencinę energiją $E_p = \frac{kx^2}{2}$; čia k – spyruoklės standumas, x – jos pailgėjimas ar sutrumpėjimas. Šiuo atveju $E_p \geq 0$ (nėra neigiama, nes x^2).

Potencinė energija taip pat reliatyvi. Absoliuti kūno potencinės energijos vertė (priklausanti nuo nulinio lygio pasirinkimo) iš tiesų neturi fizikinės prasmės, svarbus yra tik dviejų padėčių energijų skirtumas. Potencinės energijos skirtumas su minuso ženklu yra lygus potencialinių jėgų atliktam darbui:

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}) \text{ arba } A = -\Delta E_p.$$

Tai **potencinės energijos teorema.**

Potencialinių jėgų darbas priklauso nuo perkeliamo kūno pradinės ir galinės padėties, bet nepriklauso nuo perkėlimo trajektorijos formos. Tokios yra gravitacinės, tamprumo, elektrostatinės ir kt. jėgos. Perkeliant kūną uždara trajektorija, potencialinės jėgos darbas lygus nuliui. Trinties jėga yra nepotencialinė.

Sunkio jėgos darbas perkeliant kūną iš aukščio h_1 į aukštį h_2 apskaičiuojamas pagal formulę:

$$A = -(mgh_2 - mgh_1).$$

Tamprumo jėgos darbas deformuojant spyruoklę nuo x_1 iki x_2 padėties apskaičiuojamas pagal formulę:

$$A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right).$$

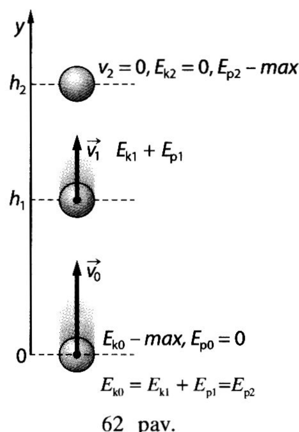
Išvados: 1) $A > 0$, kai $\Delta E_p < 0$ arba $E_{p2} < E_{p1}$ – potencinė energija mažėja (kai pakeltas virš Žemės paviršiaus kūnas juda žemyn ar deformuota spyruoklė tampa mažiau deformuota).

2) $A < 0$, kai $\Delta E_p > 0$ arba $E_{p2} > E_{p1}$ – potencinė energija didėja (kai kūnas juda aukštyn ar spyruoklė labiau deformuojama).

3) $A = 0$, kai $\Delta E_p = 0$ arba $E_{p2} = E_{p1}$ – potencinė energija nekinta.

Iš kinetinės ir potencinės energijos teoremų gauname, kad $E_{k2} + E_{p2} = E_{k1} + E_{p1}$ arba $E = E_k + E_p = const.$

Uždaroje sistemoje kūnų, veikiančių vienas kitą visuotinės traukos bei tamprumo jėgomis, kinetinė energija gali virsti potencine ir atvirkščiai, tačiau mechaninė energija nekinta. Tai – **mechaninės energijos tvermės dėsnis** (žr. 62 pav.).



62 pav.

Mechaninės energijos tvermės dėsnis galioja tik tampraus smūgio metu ir negalioja netampraus (plastinio) bei esant trinčiai: dalis arba visa mechaninė energija virsta vidine energija, t.y. pereina į naują energijos formą, vis dėlto energijos balansas išlieka. **Energijos tvermės dėsnis yra visuotinis:** $E + U = const$, t. y. sistemos mechaninės E ir vidinės U energijų suma nekinta. Šis dėsnis tinka ir svyravimams.



II. MOLEKULINĖ FIZIKA

Kūnų temperatūros arba agregatinės būsenos kitimus vadiname šiluminiais reiškiniais. Jie nagrinėjami molekulinės fizikos (šilumos) skyriuje. Šio skyriaus nagrinėjimo objektas yra iš milžiniško skaičiaus dalelių sudaryti dideli (makroskopiniai) kūnai. Molekulinę fiziką sudaro dvi pagrindinės dalys: **molekulinė kinetinė teorija** ir **termodinamika.**

1. Molekulinė kinetinė teorija

Aiškindama vykstančius šiluminius reiškinius bei makroskopinių kūnų savybes molekulinė kinetinė teorija remiasi bandymais įrodytais trimis teiginiais: 1) medžiaga sudaryta iš dalelių; 2) šios dalelės netvarkingai juda; 3) dalelės sąveikauja.

Cheminių reakcijų metu sureagavusių medžiagų masių santykis visada yra toks pat toms medžiagoms. Šį dėsningumą galima paaiškinti tuo, kad medžiagos yra sudarytos iš dalelių (atomų), kurios vykstant reakcijai jungiasi tam tikra tvarka. Medžiagos dalelių matmenis

apytikriai galima įvertinti gana paprastu bandymu. Užlašinus ant vandens alyvų aliejaus, lašas pasklinda baigtiniame paviršiaus plote. Žinodami lašo tūrį ir pasklidusios dėmės plotą, nesunkiai galime apskaičiuoti jos storį: $d = \frac{V}{S}$. Jeigu sluoksnio ploto neįmanoma padidinti, galima spėti, kad jis yra vienos dalelės (molekulės) storio. Bandymų rezultatai rodo, kad alyvų aliejaus molekulės skersmuo yra 10^{-9} m eilės. Panašūs ir kitų medžiagų molekulių matmenys. Molekules sudarantys atomai yra dar mažesni. Kiekvieno atomo skersmuo yra 10^{-10} m eilės. Molekulių (atomų) masė labai maža, todėl dažniausiai nurodoma ne SI sistemos vienetais (kg), bet **atominiais masės vienetais** (u). Atominiu masės vienetu laikoma $\frac{1}{12}$ anglies atomo masės dalis: $1\,\mathrm{u} = \frac{m_{0C}}{12} = 1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg (m_{0C} – vieno anglies atomo masė kilogramais). Šiais vienetais išreikšta dalelės masė vadinama santykine atomine (molekuline) mase arba masės skaičiumi, žymima M_r. Ji visada lygi sveikam skaičiui. Periodinėje elementų lentelėje ji nėra sveikas skaičius dėl to, kad čia nurodyta gamtoje randamų skirtingų tos medžiagos izotopų vidutinė santykinė masė.

Be kūno masės (m) ir jo medžiagos dalelių skaičiaus (N), kūnas apibūdinamas šiais dydžiais: medžiagos kiekiu, dalelių koncentracija, tankiu.

Apie kūną sudarančios medžiagos kiekį (dalelių skaičių) negalima spręsti iš jo masės, nes įvairių medžiagų atomų masės skiriasi. Kiek kūne yra medžiagos, nurodoma fizikiniu dydžiu – **medžiagos kiekiu** ν („ni“). Medžiagos kiekiu laikome kūne esančių dalelių skaičiaus santykį su atomų, esančių 0,012 kg anglies, skaičiumi: $\nu = \frac{N}{N_A}$.

Medžiagos kiekis SI vienetų sistemoje matuojamas moliais (mol). **Vienu moliu** laikomas toks medžiagos kiekis, kurį sudaro $6{,}022 \cdot 10^{23}$ dalelių. Tiek atomų yra 0,012 kg anglies. Šis skaičius vadinamas Avogadro skaičiumi: $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ mol^{-1} (visų medžiagų dalelių skaičius viename molyje yra vienodas).

Molio masė – tai medžiagos vieno molio masė. Šis dydis žymimas M, matuojamas $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{mol}}$. Kadangi 1 molyje medžiagos yra N_A dalelių, o vienos dalelės masė m_0 [kg], tai $M = m_0 N_A$. Žinodami dalelės santykinę masę (masės skaičių) bei atominio masės vieneto ryšį

su kilogramu, randame dalelės masę $m_0 = M_r \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg. Tada nesunku įrodyti, kad $M = M_r \cdot 10^{-3}\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$. Žinodami molio masę ir medžiagos kiekį, galime rasti kūno masę $m = M\nu$.

Dalelių išsidėstymo tankumą medžiagoje pasakome dalelių **koncentracija** n. Šiuo dydžiu laikome dalelių skaičių tūrio vienete: $n = \frac{N}{V}$ $[m^{-3}]$.

Dar viena medžiagos charakteristika yra **tankis** ρ. Medžiagos tankiu laikome jos masę tūrio vienete: $\rho = \frac{m}{V}\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$. Medžiagos tankis ir koncentracija – vienas kitam proporcingi dydžiai:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0 N}{V} = m_0 n.$$

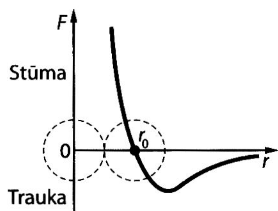
Difuzija ir Brauno judėjimas – du reiškiniai, įrodantys, kad medžiagos dalelės juda.

Difuzija – savaiminis medžiagų susimaišymas. Sparčiausiai maišosi dujinės medžiagos, lėčiausiai – kietos. Pastebėti difuzijos reiškinį kietose medžiagose galima tik po kelerių metų. Difuzijos sparta priklauso nuo medžiagų temperatūros. Aukštesnėje temperatūroje difuzija vyksta sparčiau, žemesnėje – lėčiau. Dėl difuzijos pasklinda kvapiųjų medžiagų aromatas ore, ištirpusi druska vandenyje, cukrus arbatoje.

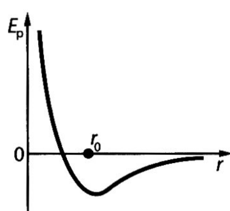
Brauno dalelių judėjimas gali būti laikomas molekulių judėjimo rezultatu. Brauno dalelės – skystyje arba dujose esančios mikrodalelės. Žiūrint pro mikroskopą, pastebėtas nenutrūkstamas šių dalelių judėjimas. Jis yra absoliučiai chaotiškas, atsitiktinis, neprognozuojamas. Mažesnės dalelės juda sparčiau, dažniau keisdamos judėjimo kryptį, didesnės – lėčiau. Kylant temperatūrai judėjimas intensyvėja, krintant – silpnėja. Brauno dalelių judėjimą galima paaiškinti taip: chaotiškai judėdamos molekulės atsitiktinai smūgiuoja į Brauno daleles ir jas išjudina. Kadangi smūgiai ne visada kompensuojasi (kur kas dažniau nesikompensuoja), Brauno dalelių judėjimas kinta.

Apie molekulių (atomų) tarpusavio sąveiką jau kalbėta mechanikoje nagrinėjant tamprumo ir trinties jėgomis apibūdinamos sąveikos atsiradimo priežastį. Dviejų sąveikaujančių dalelių sistemai būdinga potencinė energija. Dalelių galimybė atlikti darbą keičiasi kintant atstumui tarp jų. Kaip ir sąveikos jėgos, potencinės

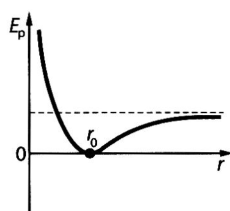
energijos priklausomybė nuo atstumo tarp dalelių yra sudėtinga. Nors šie grafikai (žr. 63 ir 64 pav.) panašūs savo forma, įsidėmėkite, kad $E_p = f(r)$ – žemiausias taškas, kai $r = r_0$, o $F_x = f(r)$ – kai $r > r_0$. Taip pat nedera pamiršti, kad nors dalelių sąveikos energija ir vadinama potencine, ji neturi nieko bendra su formule *mgh*.



63 pav.



a)



b)

64 pav.

Potencinės energijos reikšmė priklauso ne tik nuo dalelių sąveikos ar jų tarpusavio padėties, bet ir nuo stebėtojo pasirinkimo. Sutinkami du pasirinkimo variantai: a) $E_p = 0$, kai dalelės labai toli ($r = \infty$, dalelės neveikia viena kitos (64 pav., *a*)); b) $E_p = 0$, kai dalelių sąveikos atstojamoji jėga $F_x = 0$ ($r = r_0$, dalelės vienodai traukia ir stumia viena kitą (64 pav., *b*)).

Nors atomai ir molekulės neturi griežtai apibrėžto paviršiaus, įprasta šias daleles vaizduoti rutuliukais, o jų skersmenį laikyti dalelių matmenimis. Kai dalelių centrai yra r_0 atstumu vienas nuo kito, išorinių sluoksnių elektronai pradeda stipriai sąveikauti. Artinant daleles, elektroniniai apvalkalai pradeda dengti vieni kitus. Dalelės tarsi deformuojasi. Todėl atstumas r_0, kai dalelės yra pusiausviros, laikomas jų skersmeniu.

Molekulinė kinetinė teorija vaizdžiai paaiškina medžiagų savybių skirtumus joms esant skirtingų agregatinių būsenų.

Kieta medžiaga yra pastovios formos ir pastovaus tūrio. Kieto kūno dalelės, būdamos atstumu r_0, „turi“ kinetinės energijos, todėl jos svyruoja apie pusiausvyros padėtis. Kuo aukštesnė temperatūra, tuo didesnė kinetinė energija, vadinasi, tuo daugiau dalelės suartės arba atitols, kol tarpusavio sąveika jas sustabdys. Todėl didėjant kūno temperatūrai didėja ir dalelių svyravimo amplitudė. Be to, dėl $E_p = f(r)$ priklausomybės nesimetriškumo išauga vidutinis dalelių nuotolis. Taigi šildomi kūnai plečiasi. Labai retais atvejais kieto kūno dalelė gali turėti kinetinę energiją, daug didesnę už vidutinę,

ir atitrūkusi nuo likusiųjų peršokti į kitą vietą. Todėl difuzija kietose medžiagose vyksta labai lėtai.

Pusiausvirų dujų dalelių vidutinė kinetinė energija didesnė už $E_p = f(r)$ duobės gylį atitinkančią energiją. Dėl šios priežasties toldamos dalelės atitrūksta viena nuo kitos ir virsta laisvomis. Išsilaisvinusios juda tolygiai, jei jų niekas neveikia, kol priartėja prie kitų 2–3 kartus didesniu už r_0 atstumu. Tada atsiranda tarpusavio trauka. Po susidūrimo atšokusios dalelės vėl juda laisvai, todėl pasklinda po visą erdvę, kurią gali užimti.

Skysčių dalelės svyruoja, kaip ir kietų kūnų, apie pusiausvyros padėtis. Kadangi skysčio temperatūra didesnė už kietos medžiagos temperatūrą, svyravimai vyksta arti atitrūkimo ribos. Todėl dalelių šuoliai (kurių pasitaiko ir kietose medžiagose) yra labai dažni. Kai skysčio niekas neveikia, šuolių tikimybė visomis kryptimis vienoda. Jeigu skystį veikia Žemės trauka, dominuoja šuoliai viena kryptimi (vertikaliai). Todėl skystis išlaiko pastovų tūrį, bet lengvai keičia formą.

1.1. Dujos. Dujų būsenos lygtis. Dujų dėsniai

Nagrinėdami mechaninius reiškinius dažnai naudojame realaus kūno modelį – materialųjį tašką. Kalbėdami apie dujoms būdingus reiškinius taip pat dažnai taikome realiųjų dujų modelį – **idealiąsias dujas**. Jeigu dujos pakankamai retos ir jų temperatūra aukšta, didžiąją dalį laiko dalelės juda laisvai. Dujos būtų idealios, jei jų dalelės būtų materialieji taškai, sąveikaujantys tik tiesioginio susidūrimo metu (kai $r = 0$) absoliučiai tampriais smūgiais.

Dujų būsena yra apibūdinama trimis fizikiniais dydžiais (makroskopiniais parametrais): slėgiu p, temperatūra T (arba t), tūriu V.

Chaotiškai judėdamos, dujų molekulės dažnai susiduria ne tik tarpusavyje, bet ir su kūnų, kuriuos supa, paviršiais ar indo, kuriame yra, sienelėmis. Kiekvienos molekulės smūgis trunka akimirką, bet kadangi jų skaičius milžiniškas, susidaro įspūdis, kad dujos veikia pastoviai. Šį veikimą apibūdiname **slėgiu** $p = \frac{F}{S}$, matuojamu paskaliais (Pa). Gali būti naudojami ir kiti slėgio matavimo vienetai: 1 atm (atmosfera), 1 mm Hg (gyvs. stulpelio) ir kt. (1 atm $\approx$ $\approx 10^5$ Pa = 760 mm Hg). Prietaisas slėgio pokyčiui matuoti yra **mano-**

metras, o atmosferos slėgiui – **barometras**. Dujų slėgis priklauso nuo molekulių koncentracijos (smūgių dažnio) ir atskiros molekulės masės bei judėjimo greičio (smūgių stiprumo). Šią priklausomybę rodo **pagrindinė molekulinės kinetinės dujų teorijos lygtis**: $p=\frac{1}{3}nm_0\overline{v^2}$; čia $n=\frac{N}{V}$ $[m^{-3}]$ – dalelių koncentracija; m_0 [kg] – vienos dalelės masė; $\overline{v^2}=\frac{v_1^2+v_2^2+...+v_N^2}{N}$ $\left[\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2\right]$ – vidutinis molekulės greičio kvadratas. Kadangi molekulių judėjimo greičiai nėra vienodi, be to, jie kinta susidūrimų metu, bendras molekulių judėjimas apibūdinamas greičių kvadratų vidurkiu $\overline{v^2}$ arba vidutiniu kvadratiniu greičiu $<v>=\sqrt{\overline{v^2}}$. Reikia pažymėti, kad kėlimas kvadratu ir šaknies traukimas nepanaikina vienas kito, nes tarp šių veiksmų yra dar du: sudėtis ir dalyba. Kai dalelių skaičius didelis, $<v>\approx\overline{v}=$ $=\frac{v_1+v_2+...+v_N}{N}$. Todėl vidutinis kvadratinis greitis $\sqrt{\overline{v^2}}$ praktiškai sutampa su $\overline{v}$. Molekulė, kaip kiekvienas judantis kūnas, apibūdinama kinetine energija: $E_k=\frac{m_0v^2}{2}$. Tada pagrindinė molekulinės kinetinės dujų teorijos lygtis įgauna šią išraišką: $p=\frac{2}{3}n\overline{E_k}$; čia $\overline{E_k}=\frac{m_0\overline{v^2}}{2}$ – molekulės vidutinė kinetinė energija.

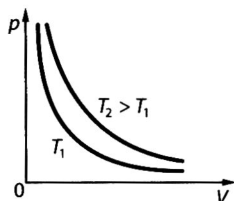
Temperatūra yra šiluminę makroskopinių kūnų būseną (jų šiltumą) apibūdinantis dydis. Dažniausiai temperatūra nustatoma matavimo prietaisu **termometru**. Termometro veikimas pagrįstas jo darbinės medžiagos kurio nors parametro (tūrio, slėgio, varžos) kitimu kintant kūno šiluminei būsenai. Turi būti palaikomas termometro darbinės medžiagos šiluminis kontaktas su matuojamu kūnu, kol nusistovės šiluminė pusiausvyra, t. y. visi darbinės medžiagos ir matuojamo kūno taškai bus vienodai šilti. Nusistovėjus šiluminei pusiausvyrai, nustos kisti makroskopiniai darbinę termometro medžiagą apibūdinantys dydžiai. Kasdieniniame gyvenime, buityje naudojamės Anderso Celsijaus sudaryta temperatūros skale. Šios skalės temperatūra žymima t, matuojama laipsniais [°C]. Paaiškėjus, kad kintant kūno temperatūrai kinta jo dalelių šiluminis judėjimas, tapo aišku, kad egzistuoja žemiausia temperatūra. Mokslininkas Viljamas Tomsonas (lordas Kelvinas) pasiūlė temperatūrą, charak-

terizuojančią kūno šiluminę būseną, kai jo dalelės nejuda, laikyti lygia nuliui. Tada naujoje temperatūrų skalėje temperatūros turėtų vien teigiamas reikšmes. Ši temperatūros skalė buvo pavadinta **absoliutine temperatūros skale**. Temperatūra joje žymima T, o jos matavimo vienetas vadinamas kelvinu [K]. Kadangi absoliutinėje temperatūros skalėje vieneto vertė liko tokia pati kaip Celsijaus skalėje ($\Delta T = \Delta t$), tai $T = t + 273$. Paaiškėjus temperatūros fizikinei prasmei, idealiųjų dujų molekulės vidutinę kinetinę energiją galima išreikšti per temperatūrą: $\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT$; čia $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\text{J}}{\text{K}}$ – Bolcmano konstanta. Iš šio sąryšio matyti, kad $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kT \cdot N_A}{m_0 \cdot N_A}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$; čia $R = k \cdot N_A = 8{,}314\ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ – universalioji dujų konstanta.

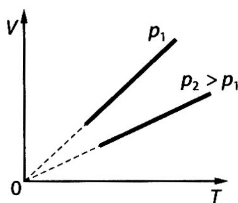
Iš pagrindinės molekulinės kinetinės dujų teorijos lygties $p = \frac{2}{3}n\overline{E_k}$ ir temperatūros fizikinę prasmę nusakančios lygties $\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT$ galime apskaičiuoti, kad $p = nkT$. Įrašę $n = \frac{N}{V}$, gauname $pV = NkT$. Išreiškę molekulių skaičių medžiagos kiekiu $N = \nu \cdot N_A$, turime Mendelejevo ir Klapeirono lygtį: $pV = \nu RT$ arba $pV = \frac{m}{M}RT$. Ši lygtis – tai **dujų būsenos lygtis**, parodanti tam tikrų dujų būseną nusakančių dydžių sąryšį: $\frac{pV}{T} = \frac{m}{M}R$. Matyti, kad pastovaus kiekio idealiųjų dujų slėgio ir tūrio sandaugos santykis su dujų absoliutine temperatūra nekinta keičiantis dujų būsenai. Iš to gauname, kad $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} = \frac{p_3V_3}{T_3} = \ldots$ – tai **dujų būsenos kitimo lygtis**, vadinama Klapeirono lygtimi. Ji rodo sąryšį tarp parametrų, apibūdinančių vienos ir kitos būsenos dujas.

Dujų būsenos kitimas nekintant vienam parametrui vadinamas **izoprocesu**. Izoprocesai skirstomi į izoterminius ($T = const$), izobarinius ($p = const$) ir izochorinius ($V = const$).

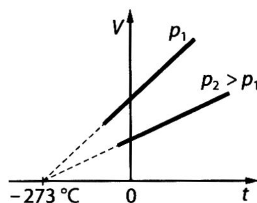
Izoterminis procesas. Jei $T = const$, iš Klapeirono lygties galima spręsti, kad $p_1V_1 = p_2V_2$ arba $\frac{p_1}{p_2}=\frac{V_2}{V_1}$ (Boilio ir Marioto dėsnis). Kadangi $pV = \nu RT = const$, tai $p=\frac{const}{V}$. Dujų slėgis keičiamas keičiant jų tūrį (suspaudžiant jas arba leidžiant plėstis). Todėl nagrinėjant p ir V sąryšį, V yra argumentas, o p – jo funkcija. Grafikas, vaizduojantis pastovaus kiekio dujų slėgio priklausomybę nuo tūrio esant pastoviai temperatūrai, vadinamas izoterme (65 pav.).



65 pav.



a)

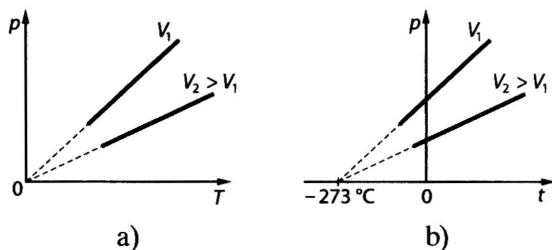


b)

66 pav.

Izobarinis procesas. Jei $p = const$, iš Klapeirono lygties gauname, kad $\frac{V_1}{T_1}=\frac{V_2}{T_2}$ arba $\frac{V_1}{V_2}=\frac{T_1}{T_2}$ (Gei-Liusako dėsnis). Dujų tūris keičiamas jas kaitinant arba vėsinant (t. y. leidžiama joms plėstis arba trauktis). Todėl, kalbant matematine kalba, T yra argumentas, o V – jo funkcija. Iš Mendelejevo ir Klapeirono lygties matyti, kad $V=\frac{\nu R}{p}T$; $V = const \cdot T$. Tiesė, vaizduojanti šią priklausomybę, vadinama izobare (66 pav., *a*). Kai temperatūra nurodoma Celsijaus skalėje (66 pav., *b*), $V = V_0(1 + \alpha \cdot t)$; čia $\alpha=\frac{1}{273°C}$ – temperatūrinis tūrio kitimo koeficientas. Grafikų dalys, kai temperatūra artima absoliutiniam nuliui, vaizduojamos punktyrais dėl to, kad realioms dujoms šioje temperatūros srityje minėtas dėsnis nebegalioja ir jų savybės nebėra panašios į idealiųjų dujų savybes.

Izochorinis procesas. Analogiškai izobariniam procesui, kai $V = const$, $\frac{p_1}{T_1}=\frac{p_2}{T_2}$ arba $\frac{p_1}{p_2}=\frac{T_1}{T_2}$ (Šarlio dėsnis).



67 pav.

$p = \frac{\nu R}{V} T$ arba $p = p_0 (1 + \gamma \cdot t)$; čia $\gamma = \frac{1}{273°C}$ – temperatūrinis slėgio kitimo koeficientas. Tiesė, vaizduojanti pastovaus dujų kiekio slėgio priklausomybę nuo temperatūros esant pastoviam tūriui, vadinama izochore (67 pav., *a, b*)*.

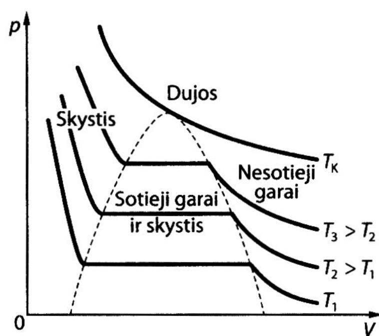
1.2. Garai, virimas, oro drėgmė

Medžiaga, neturinti nei pastovios formos, nei tūrio, kartais vadinama dujomis, o kartais garais.

Jeigu įprastomis sąlygomis medžiaga gali būti ir skysta, ir dujinė, tai įgavusi dujinę būseną ji vadinama ne dujomis, o garais. Garai būna dviejų rūšių: nesotieji ir sotieji. Garai, esantys erdvėje, į kurią dar galima išgarinti skysčio, vadinami nesočiaisiais. Nesotieji garai savo savybėmis primena idealiąsias dujas, todėl jų būsenos kitimui galima taikyti idealiųjų dujų būsenos lygtį bei dėsnius. Jeigu uždarame inde yra skystis ir virš jo nesotieji garai, tai šiluminio judėjimo metu iš skysčio išlekia (išgaruoja) daugiau molekulių, negu grįžta (kondensuojasi) iš garų į skystį. Dėl to skysčio kiekis mažėja, o garų didėja. Dėl šios priežasties didėja jų tankis, koncentracija bei slėgis, o kartu ir grįžtančių molekulių skaičius. Jei skysčio buvo pakankamai, po tam tikro laiko išgaruojančių ir grįžtančių molekulių skaičius bus vienodas. Tada nei skysčio, nei garų kiekis nebekis – nusistovės **dinaminė pusiausvyra**. Tokie garai, sudarantys dinaminę pusiausvyrą su skysčiu, vadinami **sočiaisiais**. Sumažinus sočiųjų garų tūrį (padidinus jų tankį), ši pusiausvyra sutrinka. Garai tampa persotinti. Tada daugiau kondensuojasi nei išgaruoja. Taigi sočiųjų garų slėgis, tankis ir koncentracija nepriklauso nuo tūrio. Todėl izotermiškai spaudžiant nesočiuosius garus, iš pradžių jų slėgis

---

* 67 pav., *b* pateikiamas izochorinis procesas Celsijaus skalei, todėl temperatūra žymima *t*.

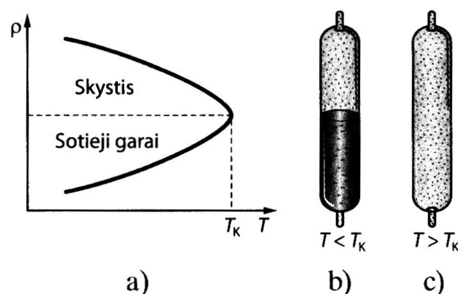


68 pav.

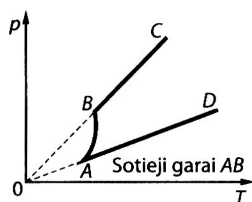
ir tankis didėja kaip ir idealiųjų dujų. Tačiau prie tam tikro slėgio garai tampa sočiaisiais ir, toliau juos spaudžiant, slėgis bei tankis nekinta, o vis daugiau garų virsta skysčiu. Spaudžiamo skysčio slėgis vėl didėja, o tankis beveik nesikeičia, nes skystis praktiškai nespūdus. Kuo aukštesnėje temperatūroje vyksta izoterminis procesas, tuo didesniam slėgiui (ir tankiui) esant garai virsta sočiaisiais. Taip pat greičiau (esant didesniam tūriui) baigiasi kondensacija, nes aukštesnėje temperatūroje skysčio tūris dėl šiluminio plėtimosi yra didesnis. Didėjant temperatūrai, izotermės horizontalioji dalis trumpėja (68 pav.). Esant temperatūrai, aukštesnei už T_K, spaudžiamų garų tankis gali didėti iki skysčio tankio, tačiau skystėjimo procesas nevyksta.

Jeigu slegiant dujinę medžiagą negalima jos priversti kondensuotis, ji vadinama ne garais, o dujomis.

Uždaroje ampulėje yra skystis ir sotieji garai (69 pav., *b*). Kaitinant skysčio tankis mažėja (jis plečiasi), o sočiųjų garų tankis didėja (69 pav., *a*). Pasiekus kritinę temperatūrą išnyksta riba (paviršius), skirianti skystį nuo garų (69 pav., *c*).



69 pav.



70 pav.

Iš Mendelejevo ir Klapeirono lygties garų slėgis $p = \frac{\rho}{M}RT$. Nesočiųjų garų izochorė tokia pati, kaip ir idealiųjų dujų, – tiesė (70 pav. atkarpos *AD* ir *BC*). Sočiųjų garų slėgis keliant tempera-

tūrą didėja sparčiau (AB), nes molekulių smūgiai ne tik stiprėja, bet ir dažnėja (didėja tankis ir koncentracija).

Nesočiuosius garus paversti sočiaisiais galima trejopai: 1) papildomai išgarinant skysčio; 2) mažinant jų tūrį (didinant tankį ir koncentraciją bei slėgį); 3) mažinant temperatūrą (vėsinant).

Virimas – tai skysčio garavimas ne tik paviršiuje, bet ir viduje. Įpylus skysčio į indą, dugno ir sienelių nelygumuose lieka mikroskopinių oro burbuliukų. Vyksta garavimas ne tik į orą, esantį virš skysčio, bet ir į tuos burbuliukus. Dėl to burbuliukų tūris didėja, ir jie, veikiami Archimedo jėgos, atitrūksta ir kyla į viršų. Patekę į aukščiau esantį, nespėjusį įšilti skystį, garai greitai kondensuojasi. Šis procesas sukelia būdingą garsą, girdimą prieš skysčiui užverdant. Tačiau greitai visas skystis įšyla vienodai – tuomet kildami burbuliukai didėja, nes vyksta intensyvus garavimas. Iškilę į paviršių, jie sprogsta, išmesdami į aplinką juose buvusius garus. Skystis verda. Jei jo sluoksnio storis nedidelis (indas negilus), sočiųjų garų slėgis burbuliukuose praktiškai lygus atmosferos slėgiui. Garų temperatūra burbuliukuose lygi skysčio temperatūrai. Kadangi sočiųjų garų slėgis didėja kylant temperatūrai, tai, didėjant slėgiui virš skysčio, didėja ir jo virimo temperatūra, ir atvirkščiai – mažinant slėgį virš skysčio, virimo temperatūra mažėja.

Oro drėgmė. Labai svarbi mus supančio oro charakteristika yra oro drėgmė, kuri apibūdinama trimis dydžiais: absoliutine drėgme, santykine drėgme ir rasos tašku. Absoliutine drėgme laikome ore esančių vandens garų tankį $\rho = \frac{m}{V}\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ arba jų dalinį slėgį p [Pa]. Šie dydžiai vienas kitam tiesiogiai proporcingi esant pastoviai temperatūrai. Iš absoliutinės drėgmės negalima spręsti, ar dar daug galima išgarinti vandens, todėl naudojamas kitas dydis, nusakantis, kaip toli ore esantys vandens garai yra iki sočiųjų būsenos. Tai santykinė drėgmė φ. Ja laikome ore esančių vandens garų tankio (slėgio) santykį su sočiųjų garų tankiu (slėgiu) toje temperatūroje: $\varphi = \frac{\rho}{\rho_S} \cdot 100\,\%$ arba $\varphi = \frac{p}{p_s} \cdot 100\,\%$, čia ρ ir p – ore esančių vandens garų tankis ir dalinis slėgis: ρ_s ir p_s – sočiųjų vandens garų tankis ir slėgis.

Vėstant orui, vėsinami nesotieji garai tam tikroje temperatūroje virsta sočiaisiais ir toliau vėsdami pradeda kondensuotis, iškrenta rasa. Temperatūra, kai ore esantys vandens garai virsta sočiaisiais, vadinama rasos tašku t_r. Kuo t_r žemesnė, lyginant su oro temperatūra t, tuo oras sausesnis.

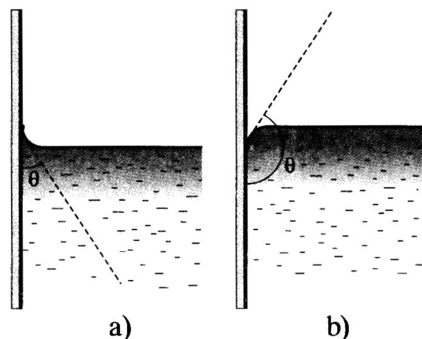
Oro drėgmė nustatoma trimis prietaisais: **plaukiniu higrometru, Augusto psichrometru** ir **metaliniu higrometru**. Plaukiniu higrometru ir psichrometru nustatoma santykinė drėgmė. Plaukinio higrometro veikimas pagrįstas plauko ilgio kitimu, keičiantis jį supančio oro drėgmei. Psichrometrą sudaro du termometrai: sausas ir drėgnas. Drėgno termometro termometrinio skysčio rezervuaras yra apvyniotas drėgnu skudurėliu. Kuo sausesnis oras, tuo intensyviau iš skudurėlio garuoja vanduo ir tuo stipriau atvėsina termometrą. Žinodami sauso ir drėgno termometrų rodmenis bei jų skirtumą, psichrometrinėje lentelėje randame santykinės oro drėgmės skaitinę vertę. Metaliniu higrometru nustatomas rasos taškas. Jame esančio lakaus skysčio dėka prietaiso korpusas, atšaldęs aplinkinius vandens garus, priverčia juos kondensuotis, ir prietaisas aprasoja. Nustatę, kokia buvo prietaiso temperatūra prasidėjus kondensacijai (arba dingus rasai), sužinome rasos tašką.

Reikia pažymėti, kad garai nematomi. Buitinėje kalboje virš verdančio vandens „matomi garai" iš tikrųjų yra ne garai, bet susikondensavę mažyčiai rūko lašeliai.

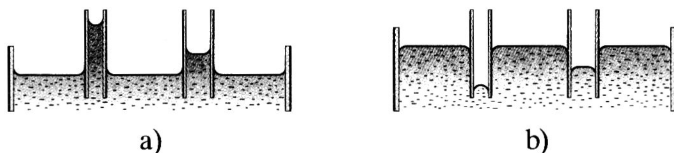
1.3. Skysčių savybės. Kapiliarumas

Kadangi skysčio molekulės labai dažnai išsilaisvina, užsukant čiaupą vandens srovė turėtų plonėti, kol galiausiai taptų nematoma. Iš tikrųjų sumažėjusi srovė nutrūksta ir vanduo pradeda lašėti lašais. Nors molekulės praeina per čiaupą ir gali laisvai kristi, tačiau tai nevyksta. Skysčio paviršius lyg savotiška plėvelė laiko molekules sukauptas. Nesvarumo sąlygomis lašas yra rutulio formos. Rutulio paviršiaus plotas yra mažiausias lyginant su to paties tūrio kitų formų kūnų paviršiais. Vadinasi, skysčio paviršius stengiasi susitraukti. Šis veikimas atsiranda dėl to, kad paviršiuje esančias molekules gilesnių sluoksnių molekulės traukia prie savęs. Paviršiaus veikimas stengiantis sumažėti charakterizuojamas paviršiaus įtempimo jėga $\vec{F}$. Jos modulis priklauso nuo skysčio rūšies ir linijos, kurią paviršius veikia, ilgio: $F = \sigma \cdot l$. $\sigma\left[\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}\right]$ – skysčio paviršiaus įtempimo koeficientas – dar vienas fizikinis dydis, apibūdinantis skystį. Paviršiaus veikimo kryptis lygiagreti su paviršiumi (jo liestine, jei paviršius kreivas) ir statmena linijai, kurią jis veikia. Kylant skysčio temperatūrai, įtempimo koeficientas mažėja.

Pagal tai, kaip skysčiai funkcionuoja susilietę su kietu kūnu, jie skirstomi į drėkinančius ir nedrėkinančius. Jei skysčio dalelės tarpusavyje sąveikauja silpniau negu su kieto kūno dalelėmis, toks skystis prilimpa prie kieto kūno ir yra vadinamas drėkinančiu. Dėl šios priežasties skysčio paviršius prie indo sienelės yra išlinkęs ir pakilęs į viršų (71 pav., *a*). Kampas θ („teta“) tarp skysčio paviršiaus liestinės ir indo sienelės yra smailus. Visiško drėkinimo atveju skysčio paviršiaus liestinė lietimosi taške su paviršiumi sudaro kampą $\theta = 0°$. Jei skysčio dalelės tarpusavyje sąveikauja stipriau negu su kieto kūno dalelėmis, toks skystis nedrėkina kieto kūno. Tokio skysčio paviršius prie indo sienelės nusileidžia žemyn (71 pav., *b*). Kampas θ yra bukas. Visiško nedrėkinimo atveju $\theta = 180°$. Pavyzdžiui, vanduo drėkina stiklą, bet nedrėkina parafino. Stiklo nedrėkina gyvsidabris. Įstatytame į skystį siaurame vamzdelyje (kapiliare) drėkinantis skystis pakyla virš bendro skysčio lygio (72 pav., *a*), nedrėkinantis nusileidžia žemiau (72 pav., *b*). Šis reiškinys vadinamas **kapiliarumu**.

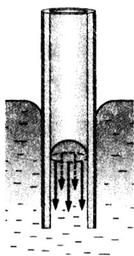


71 pav.



72 pav.

Visiško drėkinimo ar nedrėkinimo atveju kapiliariniame vamzdelyje esančio skysčio paviršius yra pusrutulio formos, ir visuose paviršiaus sąlyčio su vamzdeliu taškuose skysčio paviršiaus veikimo kryptis yra vertikalė. Drėkinimo atveju skysčio paviršius vamzdelį veikia žemyn, vamzdelis paviršių (ir po juo esantį skystį) – į viršų. Skystis nustoja kilti, kai jo sunkio jėga tampa lygi skysčio paviršiaus įtempimo jėgai ($F_{įt} = mg$). Iš to gauname, kad skysčio pakilimo kapiliare aukštis $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$; čia ρ – skysčio tankis, σ – skysčio paviršiaus įtempimo koeficientas, *r* – kapiliaro angos kreivumo spindulys. Nedrėki-



73 pav.

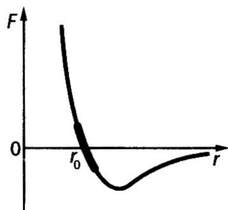
nimo atveju kreivas skysčio paviršius sukelia papildomą slėgį žemyn ir skystis nusileidžia (73 pav.). Pusrutulio formos paviršiaus slėgis $p = \frac{F}{S}$; iš čia $F = \sigma \cdot l = \sigma \cdot 2\pi \cdot r$, $S = \pi \cdot r^2$. Atlikę veiksmus gauname, kad $p = \frac{2\sigma}{r}$. Nedrėkinantis skystis nustoja leistis žemyn, kai papildomas slėgis ir šalia kapiliaro esančio nenusileidusio skysčio slėgis susilygina: $\frac{2\sigma}{r} = \rho g h$. Iš to galima apskaičiuoti, kad skysčio nusileidimo aukštis $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$.

1.4. Kietieji kūnai. Deformacijos

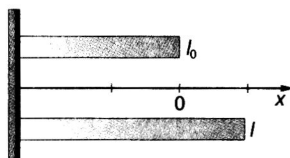
Turintys pastovią formą ir tūrį kūnai vadinami kietaisiais. Jie yra dviejų rūšių: kristaliniai ir amorfiniai. Kristalams būdingas juos sudarančių dalelių taisyklingas išsidėstymas, periodiškai pasikartojantis tūkstančius kartų. Dalelių išsidėstymo tvarka lemia tų medžiagų savybes. Pavyzdžiui, deimantas ir grafitas yra sudaryti iš tų pačių anglies atomų, tačiau jų savybės labai skirtingos. Kristaliniai kūnai skirstomi į monokristalinius (deimantas, kvarcas, įvairios druskos) ir polikristalinius (metalai, granitas). Monokristalai – tai stambūs pavieniai taisyklingi kristalai. Polikristalinės medžiagos yra sudarytos iš daugybės chaotiškai išsidėsčiusių smulkių, tarpusavyje suaugusių kristalų.

Amorfinės medžiagos (vaškas, gintaras, stiklas) neturi kristalinės struktūros. Kristaliniai ir amorfiniai kūnai šildomi keičiasi nevienodai. Kiekvienai kristalinei medžiagai būdinga tam tikra lydymosi temperatūra. Toje pačioje temperatūroje vėsinama skysta medžiaga kietėja (kristalizuojasi). Šildomos amorfinės medžiagos minkštėja, kol virsta skystomis (neturi apibrėžtos lydymosi temperatūros). Dažnai amorfinės medžiagos laikomos didelio klampumo skysčiais, kurių klampumas šylant mažėja. Kai kurių medžiagų kristalų fizinės savybės (tvirtumas, šiluminis ir elektrinis laidumas) nėra vienodos įvairiomis kryptimis. Ši monokristalų savybė vadinama anizotropija.

Kietojo kūno formos keitimas vadinamas deformacija. Ji skirstoma į tokias rūšis: tempimo, gniuždymo, lenkimo, šlyties ir sukimo.



74 pav.



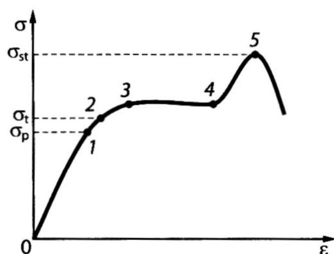
75 pav.

Kai nustojus veikti deformuotas kūnas atgauna pradinę formą, sukelta deformacija vadinama tampriąja, jeigu lieka deformuotas – plastine.

Nedeformuoto kūno dalelės svyruoja apie padėtis, kuriose jų sąveikos jėgų atstojamoji lygi nuliui (74 pav.). Deformacijos metu vidutiniai atstumai tarp dalelių šiek tiek pakinta. Suartintos dalelės pradeda stumti viena kitą, atitolusios – traukti. Išnykus išoriniam veikimui, tarpusavio sąveikos dėka dalelės sugrįžta į buvusias savo padėtis. Didėjant deformacijai dalelės atitrūksta viena nuo kitos ir peršoka į naujas pusiausvyros padėtis – sukeliama plastinė deformacija. Kadangi deformuotas tamprus kūnas stengiasi atgauti pradinę formą, jis veikia jį deformavusius kūnus. Tempimo (gniuždymo) deformacijai būdingas dėsningumas mechanikoje nusakomas jau nagrinėtu Huko dėsniu: $F = kx$. Kiek kūnas yra deformuotas, pasakoma absoliutiniu pailgėjimu (sutrumpėjimu) $\Delta l = l - l_0$. Mechanikoje absoliutinė deformacija buvo nusakoma kūno galo koordinate x, koordinačių pradžia laikant nedeformuoto kūno galo padėtį (75 pav.). Kuo didesnis pradinis kūno ilgis l_0, tuo mažiau pakinta atstumai tarp dalelių esant tai pačiai absoliutinei deformacijai. Todėl naudojamas dar vienas dydis deformacijai apibūdinti. Tai santykinis pailgėjimas (sutrumpėjimas) arba santykinė deformacija ε. Santykine deformacija laikome absoliutinės deformacijos ir pradinio kūno ilgio santykį $\varepsilon = \dfrac{\Delta l}{l_0}$ [nedimensinis dydis]. Šis dydis parodo, kokia pusiausvyrinio atstumo r_0 dalimi padidėjo atstumas tarp dalelių. Kuo didesnis ε, tuo stipriau sąveikaus dalelės, o kartu ir stipriau veiks deformuotas kūnas. Deformuoto kūno veikimo pobūdis priklauso ne tik nuo dalelių tarpusavio sąveikos, bet ir nuo jų skaičiaus visame kūno skerspjūvyje. Be tamprumo jėgos, naudoja-

mas dar vienas dydis, apibūdinantis deformuoto kūno veikimą – mechaninis įtempimas (mechaninė įtampa) σ. Šiuo dydžiu laikome tamprumo jėgos ir kūno skerspjūvio ploto santykį: $\sigma = \frac{F}{S}$. Mechaninė įtampa SI vienetų sistemoje matuojama, kaip ir slėgis, paskaliais $\left[1\,\mathrm{Pa} = \frac{1\,\mathrm{N}}{1\,\mathrm{m}^2}\right]$. Mechaninė įtampa apibūdina 1 m^2 plote esančių dalelių sąveiką. Deformuoto kūno savybes nusakantis dydis – tamprumo koeficientas – yra tiesiogiai proporcingas kūno skerspjūvio plotui S bei atvirkščiai proporcingas pradiniam jo ilgiui l_0, taip pat priklauso nuo kūno medžiagos rūšies. $k = \frac{ES}{l_0}$; čia E – medžiagos tamprumo (Jungo) modulis – medžiagą charakterizuojantis dydis, matuojamas paskaliais. Jis parodo, kokia jėga sąveikautų 1 m^2 plote esančios medžiagos dalelės, jeigu atstumas tarp jų padidėtų dvigubai (taptų $2r_0$). Įrašę į Huko dėsnį $F = k\Delta l$, $k = \frac{ES}{l_0}$ ir $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$, gauname naują šio dėsnio išraišką $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Deformuoto tampraus kūno mechaninė įtampa tiesiogiai proporcinga santykinei deformacijai. Šis dėsnis (abi išraiškos) galioja tik esant nedidelėms deformacijoms, dalelių sąveikos grafiko $F = f(r)$ tiesinėje dalyje.

76 pav. pavaizduotoje $\sigma = f(\varepsilon)$ priklausomybėje *1* tašką atitinkanti santykinė deformacija yra Huko dėsnio galiojimo riba (mechaninė įtampa σ_p – proporcingumo riba). Jeigu apkrovą didinsime toliau, vyks netiesinė deformacija: mechaninė įtampa jau nebus tiesiogiai proporcinga santykiniam pailgėjimui. Tačiau kai netiesinės deformacijos nedidelės (neviršija 0,1 %), nustojus veikti kūnas atgauna savo formą ir matmenis (grafiko *2* taškas). Didžiausias įtempimas, kuriam esant dar nevyksta liekamoji deformacija, vadinamas tamprumo riba σ_t. Viršijus *2* tašką atitinkančią deformaciją, atsiranda liekamosios deformacijos. Medžiagos, kuriose nedidelės apkrovos sukelia plastines (liekamąsias) deformacijas, vadinamos plastiškomis. Jeigu sukeliama *3* grafiko tašką atitinkanti deformacija, kūnas ilgėja nedidinant veikimo. Grafiko *3–4* sritis vadinama takumo sritimi. Sukėlus



76 pav.

5 grafiko tašką atitinkančią deformaciją kūnas suyra, nes pasiekta stiprumo riba σ_{st}. Stiprumo ribą atitinkančios įtampos santykis su tamprumo ribą atitinkančia įtampa vadinamas medžiagos atsparumo atsargos koeficientu: $n = \frac{\sigma_{st}}{\sigma_t}$. Medžiagos, kurių σ_{st} pasiekiama esant labai mažam santykiniam pailgėjimui ε, vadinamos trapiomis.

2. Termodinamikos pagrindai

Fizikos dalis, kurioje nagrinėjami šiluminiai reiškiniai nekreipiant dėmesio į medžiagos sandarą, yra vadinama termodinamika, o reiškiniuose dalyvaujančių kūnų sistema – termodinamine sistema. Šios sistemos (ją sudarančių kūnų) šiluminė būsena apibrėžiama dviem fizikiniais dydžiais: **temperatūra** ir **vidine energija**. Temperatūra apibūdinamas kūno dalelių šiluminis judėjimas. Jei kyla kūno temperatūra, vadinasi, intensyvėja chaotiškas jo dalelių judėjimas. Kadangi dalelės juda, joms būdingos kinetinės energijos. Dalelės taip pat sąveikauja, todėl kiekviena jų pora charakterizuojama tarpusavio sąveikos potencine energija. Visų kūno dalelių judėjimo ir sąveikos energija vadinama vidine kūno energija U. Kūno vidinė energija nusako, kokį didžiausią darbą gali atlikti kūnas dėl to, kad jo dalelės juda ir tarpusavyje sąveikauja. Vidinę kūno energiją galima keisti dvejopai: 1) atliekant darbą; 2) vykstant šilumos perdavimui (šiluminei apykaitai). Įsidėmėkite, kad šiluma nėra objektas, todėl termino „šilumos perdavimas" nedera suprasti pažodžiui. Šilumos perdavimas (šiluminė apykaita) – tai reiškinys, kurio metu kinta dviejų kūnų vidinė energija (galimybė atlikti darbą): vieno didėja, kito mažėja. Šiluminė apykaita gali vykti trimis būdais: šiluminio laidumo, konvekcijos ir spinduliavimo.

Tam, kad vyktų šiluminė apykaita laidumo būdu, kūnai turi liesti vienas kitą. Intensyviau judančios šilto kūno paviršiaus dalelės, susidurdamos su šalto kūno paviršiaus dalelėmis, priverčia ir šias intensyviau judėti. Šiltesniame kūne jos yra pristabdomos, ir kartu pačios pristabdo gilesniuose sluoksniuose esančias daleles, su kuriomis susiduria. Taip šiltesniu kūnu sklinda atvėsimas (dalelių judėjimas sulėtėja), o šaltesniu – įšilimas (dalelių judėjimas pagreitėja). Sparčiausiai šis procesas vyksta kietose medžiagose, lėčiausiai – dujose. Medžiagos savybė, turinti įtakos šiluminei apykaitai šiuo būdu,

kaip ir pats būdas, vadinama šiluminiu laidumu. Geri šilumos laidininkai yra metalai, blogi – medis, plastmasė, stiklas, porcelianas.

Viena ranka palietę ant stalo gulinčias žirkles, o kita pieštuką jusime, kad žirklės yra šaltesnės. Jei žirklių ir pieštuko temperatūra būtų aukštesnė už rankų temperatūrą, atrodytų, jog žirklės šiltesnės už pieštuką. Taip yra todėl, kad geležis – geresnis šilumos laidininkas, o medis – blogesnis. Šiluminė apykaita dujose ir skysčiuose laidumo būdu yra labai lėta, nes jie blogi šilumos laidininkai. Tačiau čia ji gerai vyksta konvekcijos būdu, t.y. maišantis pačiai medžiagai. Konvekcija yra dviejų rūšių: laisvoji ir priverstinė. Pučiantis ventiliatorius nuo šildančio kūno sušilusį orą priverčia judėti į kitą vietą, o prie šildytuvo pritraukia šaltą. Tai priverstinės konvekcijos pavyzdys. Norėdami sušildyti vandenį puode, kaitiname jo apačią. Šildomas vanduo plečiasi (mažėja jo tankis). Dėl Archimedo jėgos poveikio šiltas vanduo kyla į viršų, o į jo vietą leidžiasi didesnio tankio šaltas vanduo. Tai laisvosios konvekcijos pavyzdys. Analogiškai patalpos oras šildomas radiatoriumi. Kaip matome, laisvosios konvekcijos metu iš vienos vietos į kitą sklinda ne šiluma (tokio objekto nėra!), bet medžiaga. Konvekcijos būdu vėsinamo skysčio ar dujų šaldoma viršutinė dalis. Nesvarumo sąlygomis laisvoji konvekcija nevyksta, nes nėra Archimedo jėga nusakomo veikimo. Nenorėdamas sušalti žiemą, žmogus dėvi kailinius. Juos dėvi ir vietovių, kurių aplinkos temperatūra aukštesnė už žmogaus kūno temperatūrą, gyventojai. Iš tikrųjų kailiniai nei šildo, nei šaldo. Juose esantis oras yra blogas šilumos laidininkas, o kailio plaukeliai trukdo vykti konvekcijai. Todėl kailiniai yra geras šilumos izoliatorius. Analogiškai purus sniegas (jame esantis oras) apsaugo augalų šaknis nuo iššalimo.

Kadangi Saulę ir Žemę skiria didžiulė beorė erdvė (vakuumas), šie kūnai negali dalyvauti šiluminėje apykaitoje nei konvekcijos, nei šiluminio laidumo būdu. Jų šiluminė apykaita vyksta spinduliavimo būdu. Saulė spinduliuoja šiluminius spindulius, o Žemė sugeria. Šiluminiai (infraraudonieji) spinduliai – tai sklindantis elektromagnetinis laukas (neturinti medžiagos savybių materija). Tuštumoje jie sklinda 300 000 km/s greičiu. Kiekvienas kūnas spinduliuoja ir tuo pačiu metu sugeria iš kitų kūnų sklindančius šiluminius spindulius. Gebėjimas sugerti šiluminius spindulius priklauso nuo kūno spalvos. Geriausiai sugeria juodi, tamsūs, o mažiausiai (daugiausiai atspindi) – balti, veidrodiniai kūnai. Kuo aukštesnė kūno temperatūra, tuo intensyviau jis spinduliuoja. Kai kūnas daugiau išspinduliuoja šiluminių spindulių negu sugeria, jis vėsta. Šiluminės apykaitos

metu vėstančių kūnų vidinė energija mažėja, šylančių – didėja. Šis pokytis apibūdinamas fizikiniu dydžiu – šilumos kiekiu Q [J]. Jei kūnas sušilo, jo vidinė energija padidėjo: $Q > 0$. Sakome, kad kūnas gavo šilumos kiekį. Jei atvėso, $Q < 0$, kūnas atidavė šilumą. Kūnams, kurie sudaro izoliuotą nuo aplinkos (uždarą) termodinaminę sistemą, galioja vidinės energijos tvermės dėsnis: $U_1 + U_2 + \ldots + U_N = const$. Paaiškėja, kad uždaroje kūnų sistemoje vykstant šiluminei apykaitai, jų gautų ir atiduotų šilumos kiekių suma lygi nuliui: $Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_N = 0$. Tai **šilumos balanso lygtis**. Kai kada naudojama kita šilumos balanso lygties išraiška: $Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_N = Q_1' + Q_2' + \ldots + Q_n'$. Šioje lygtyje visi šilumos kiekiai yra teigiami. Gautieji yra vienoje lygybės pusėje, o atiduotieji – kitoje.

Kintant kūno vidinei energijai kinta jo temperatūra arba agregatinė būsena. Pakitus kūno temperatūrai, jo vidinės energijos pokytis priklauso nuo kūno medžiagos rūšies, jo masės ir temperatūros pokyčio:

$Q = cm(t_2 - t_1)$; $Q = cm\Delta t$ arba $Q = cm(T_2 - T_1)$; $Q = cm\Delta T$ ($\Delta t = \Delta T$ **temperatūrų pokyčiai Celsijaus ir absoliutinėje temperatūrų skalėse vienodi!**). t_2 (T_2) – galutinė temperatūra; t_1 (T_1) – pradinė temperatūra; m – kūno masė; $c\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$ – savitoji medžiagos šiluma, šilumines medžiagos savybes charakterizuojantis dydis, kuris parodo, kiek pakinta 1 kg medžiagos vidinė energija temperatūrai pakitus 1 K arba 1 °C. $Q > 0$, jei $\Delta t > 0$, ir $Q < 0$, jei $\Delta t < 0$.

Sušildytas iki lydymosi (skystėjimo) temperatūros ir toliau šildomas kietas kūnas virsta skysčiu. Norint lydymosi temperatūros kūną išlydyti, reikia padidinti jo vidinę energiją. Išlydyto m masės kūno vidinės energijos pokytis $Q = \lambda m$; čia $\lambda\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}}\right]$ – medžiagą apibūdinantis fizikinis dydis – savitoji medžiagos lydymosi (kristalizacijos) šiluma. Šis dydis rodo, kiek padidėja (o kristalizuojantis sumažėja) 1 kg medžiagos vidinė energija pakintant agregatinei būsenai lydymosi (kristalizacijos) temperatūroje. Lydantis $Q > 0$, kristalizuojantis $Q < 0$, todėl kristalizacijos (kietėjimo) $Q = -\lambda m$. Kieto kūno skystėjimas ir skysčio kietėjimas vyksta toje pačioje temperatūroje, būdingoje tik tai medžiagai.

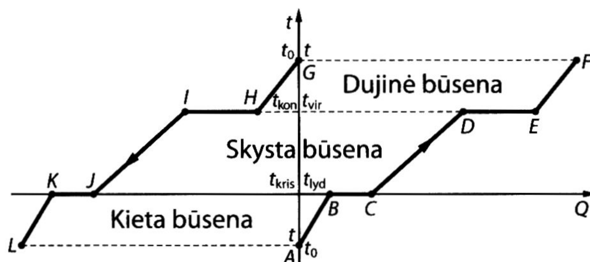
Skysčio garavimas ir jam atvirkščias reiškinys kondensacija gali vykti įvairiose temperatūrose. Norint, kad skystis virstų garais pastovioje temperatūroje (susidarę garai būtų tos pačios temperatūros),

skystį būtina šildyti. Nešildomo skysčio (ir susidariusių garų) temperatūra mažėja. Vidinės energijos pokytis *m* masės skysčiui virstant tos pačios temperatūros garais išreiškiamas formule $Q = Lm$. $L\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}}\right]$ – savitoji medžiagos garavimo (kondensacijos) šiluma. Ji parodo, kiek 1 kg garų vidinė energija didesnė už tos pačios temperatūros 1 kg skysčio vidinę energiją. Kondensuojantis $Q = -Lm$, nes vidinė energija sumažėja (aušinami garai virsta tos pačios temperatūros skysčiu). Savitoji medžiagos garavimo šiluma priklauso nuo skysčio temperatūros. Aukštesnės temperatūros skysčio savitoji šiluma mažesnė. Nors skystis gali garuoti esant bet kokiai temperatūrai, spręsdami uždavinius laikome, kad šildomas iki virimo temperatūros skystis negaruoja, o garavimas vyksta tik virimo metu.

Medžiagos temperatūros bei agregatinės būsenos kitimo procesus galima pavaizduoti grafiškai (77 pav.). Grafiko *AB*, *CD* ir *EF* atkarpos atitinka kietos, skystos ir dujinės medžiagos šilimo procesus. Atitinkamai *GH*, *IJ* ir *KL* – aušimo procesus. Iš grafiko pasvirimo į temperatūros *t* ašį kampo galima spręsti apie tos pačios masės medžiagos įvairių būsenų savitąją šilumą. Kuo kampas didesnis, tuo didesnė medžiagos savitoji šiluma.

Grafiko *BC* atkarpa atitinka lydymosi (skystėjimo) procesą, o *JK* – kristalizacijos (kietėjimo) ($t_{lyd} = t_{kris}$). *DE* – garavimo (virimo) procesas, *HI* – kondensacijos ($t_{vir} = t_{kon}$). Iš grafiko atkarpų *BC* (*JK*) ir *DE* (*HI*) ilgių galima spręsti apie tos pačios masės medžiagos savitųjų lydymosi (kristalizacijos) ir garavimo (kondensacijos) šilumų didumą. Kuo grafiko atkarpa ilgesnė, tuo viena iš minėtųjų savitoji šiluma didesnė.

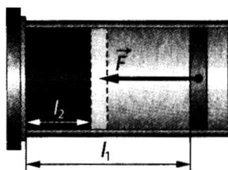
Medžiagos agregatinės būsenos kitimo grafikas



77 pav.

Vidinė energija kinta ir kūnui degant. Degimas – ne tik fizikinis, bet ir cheminis reiškinys. Jo metu vyksta anglies oksidacijos reakcija. Iš vieno anglies ir dviejų deguonies atomų susidarant CO_2 molekulei, šių dalelių tarpusavio sąveikos energija sumažėja, todėl tiek pat padidėja degimo produktų šiluminio judėjimo energija, pakyla jų temperatūra. Degimo produktai šildo šiluminėje apykaitoje dalyvaujančius kūnus. Nors kuro ir degimui sunaudoto deguonies (gautų degimo produktų) vidinė energija sumažėja, sprendžiant uždavinius kuro išskirtas šilumos kiekis laikomas teigiamu ($Q = qm$) ir balanso lygtis užrašoma taip: $Q = Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n$; čia Q_1, Q_2, ... Q_n – šildomų kūnų gauti šilumos kiekiai; Q – kuro išskirtas šilumos kiekis; $q\left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$ – savitoji kuro degimo šiluma, parodanti, kiek sumažėjo 1 kg kuro esančių anglies atomų ir degimui sunaudoto deguonies atomų tarpusavio sąveikos potencinė energija. Degimas – vienas iš labiausiai paplitusių šiluminių reiškinių. Jis vyksta ne tik įprastoje krosnyje, automobilių varikliuose, bet ir gyvūnų organizmuose. Pavyzdžiui, kad žmogus atstatytų savo galimybes atlikti darbą, jis būtinai turi valgyti ir kvėpuoti. Įkvėpto deguonies ir maiste esančių anglies atomų dėka žmogaus (gyvūno) organizme vyksta degimo reakcija. Iškvėpdamas žmogus pašalina degimo produktą – susidariusį anglies dioksidą.

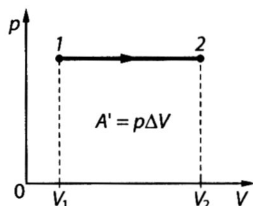
Antra vidinės (šiluminės) energijos kitimo priežastis yra mechaninis darbas. Jeigu judantys kūnai sąveikauja trinties jėgomis arba yra veikiami skysčių ar dujų, kuriuose juda, pasipriešinimo, tai jų (taip pat ir skysčių bei dujų) vidinė energija didėja, o mechaninė mažėja. Kadangi trinties (pasipriešinimo judėjimui) jėgų darbas neigiamas ($A_{tr} < 0$), tai $\Delta U = -A_{tr}$ ir $A_{tr} = \Delta E$. Iš to aišku, kad $\Delta U = -\Delta E$ arba $\Delta U + \Delta E = 0$. Vadinasi, $U + E = const.$ Tai bendrasis energijos tvermės dėsnis. Jis teigia, kad uždarą sistemą sudarančių kūnų pilnutinė energija (mechaninė ir vidinė kartu) nekinta vykstant mechaniniams ir šiluminiams reiškiniams. Taip pat vidinė kūno energija didėja plastinių (liekamųjų) kūno deformacijų metu. Jos pokytis lygus darbui, atliktam plastiškai deformuojant kūną. Dujų vidinė energija gali kisti dėl atliekamo darbo kintant jų tūriui. Panagrinėkime izobarinį dujų suspaudimą cilindre su slankiu stūmokliu.



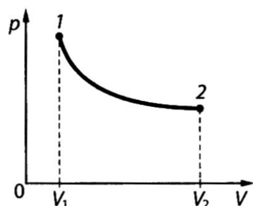
78 pav.

Spausdami stūmoklį (78 pav.) (kartu su dujomis) jėga $\vec{F}$ ir pastumdami atstumu $\Delta l = l_1 - l_2$, atliekame darbą $A = F\Delta l$. Kadangi $F = pS$, tai $A = pS\ (l_1 - l_2) = -p(Sl_2 - Sl_1) = -p(V_2 - V_1) = -p\Delta V$. Pagal trečiąjį Niutono dėsnį galima nustatyti, kad dujos taip pat veikia stūmoklį, tik priešinga kryptimi. Todėl dujų darbas A' bus tokio pat dydžio, tik priešingo ženklo: $A' = p\Delta V$. Suspaudžiant dujas, išorinių jėgų darbas teigiamas ($A > 0$), nes $\Delta V < 0$, o pačių dujų – neigiamas ($A' < 0$), nes jos priešinasi suspaudimui. Jeigu dujos plečiasi, tai $A < 0$, o $A' > 0$. Apie dujų atliktą darbą galima spręsti iš $p = f(V)$ grafiko su V ašimi ribojamo ploto (79 pav., *a*).

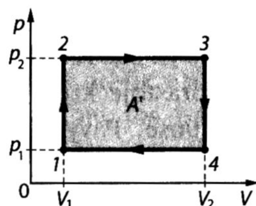
Tai galima taikyti ir procesams, kurių metu slėgis kinta (79 pav., *b*).



a)



b)



c)

79 pav.

Uždaro ciklo metu dujų atliktas darbas skaitine verte lygus grafiko (79 pav., *c*) ribojamam plotui $A' = A'_{23} + A'_{41} = p_2\ (V_4 - V_1) + p_1(V_1 - V_4) = p_2\ (V_4 - V_1) - p_1\ (V_4 - V_1) = (p_2 - p_1)\ (V_4 - V_1)$, o $A'_{12} = 0$ ir $A'_{34} = 0$, nes šių procesų metu $\Delta V = 0$.

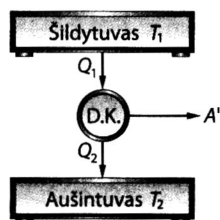
Šiluminiams reiškiniams būdingi dėsningumai nusakomi I ir II termodinamikos dėsniais.

Pirmasis termodinamikos dėsnis teigia, kad kūno (jų sistemos) vidinės energijos pokytis lygus išorinių jėgų atlikto darbo ir sistemai suteikto šilumos kiekio sumai: $\Delta U = Q + A$; kadangi $A = -A'$, tai $\Delta U = Q - A'$. Gauname, kad $Q = \Delta U + A'$. Jeigu dujų procesas izochorinis ($\Delta V = 0$), tai $A' = 0$. Tada $\Delta U = Q$ – vidinė energija kinta tik vykstant šiluminei apykaitai (jei $Q > 0$, tai $\Delta U > 0$; jei $Q < 0$, tai $\Delta U < 0$). Izoterminio proceso metu $\Delta T = 0$, taigi ir $\Delta U = 0$.

Todėl $Q = A'$. Norint, kad šildomų dujų vidinė energija nekistų, reikia, kad jos atliktų darbą, lygų gautam šilumos kiekiui. Suspaudžiant dujas izotermiškai ($A > 0$; $A' < 0$), būtina jas vėsinti ($Q < 0$). Izobarinio proceso metu besiplečiančios dujos ($A' > 0$) turi būti šildomos ($Q > 0$), be to, $\Delta U > 0$, nes $\Delta T > 0$. Jei dujos izobariškai suspaudžiamos, tai $A' < 0$, $Q < 0$ ir $\Delta U < 0$. Iš I termodinamikos dėsnio galima apskaičiuoti, kad $Q = \Delta U + A'$. Vadinasi, izobariškai besiplečiančioms dujoms reikia suteikti didesnį šilumos kiekį už jų atliekamą darbą ($Q > A'$). Izobariškai suspausdami dujas, turime ne tik atlikti darbą, bet ir jas vėsinti. Be to, $A < |Q|$.

Be šių izoprocesų, praktikoje plačiai taikomas dar vienas dujų procesas. Dujų procesas, vykstantis termiškai izoliuotoje sistemoje ($Q = 0$), vadinamas **adiabatiniu**. Jo metu $A' = -\Delta U$. Adiabatiškai besiplečiančių dujų darbas lygus jų vidinės energijos sumažėjimui. Adiabatiškai suspaustų dujų vidinės energijos pokytis lygus jas suspaudžiant atliktam darbui ($\Delta U = A$).

Nors pirmasis termodinamikos dėsnis neatmeta abipusio energijų kitimo, tačiau šiluminiai reiškiniai vyksta tik viena kryptimi, yra negrįžtami. Šiluminių reiškinių kryptį nusako **antrasis termodinamikos dėsnis**. Yra įvairių šio dėsnio formuluočių, bet visų jų esmė tokia: vykstant šiluminei apykaitai šiltesnių kūnų vidinė energija mažėja, šaltesnių – didėja. Taip pat įvairių reiškinių metu mechaninė energija virsta vidine. Šiems negrįžtamiesiems reiškiniams galima sukelti priešingus reiškinius. Tačiau jie vyksta tik būdami sudėtingesnio reiškinio dalimi. Panaudojant sudegančio kuro vidinę energiją tam tikruose įrenginiuose – šiluminiuose varikliuose – gaunama mechaninė energija. Yra tokių rūšių šiluminiai varikliai: garo mašina, garo (dujų) turbina, vidaus degimo variklis, reaktyvinis variklis. Nors šių mašinų konstrukcijos labai skirtingos, jų veikimo principas bendras. Šiluminę mašiną sudaro: šildytuvas, darbinis kūnas (D.K.), aušintuvas (80 pav.). Šildytuve iš sudegančio kuro darbinis kūnas gauna šilumos kiekį Q_1. Panaudodamas energiją (jos dalį), kūnas atlieka reikalingą mechaninį darbą. Likusią šiluminės energijos dalį Q_2 jis atiduoda aušintuvui.



80 pav.

Šiluminės mašinos naudingumo koeficientas

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} \cdot 100\,\% = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\,\% = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \cdot 100\,\%.$$

Prancūzų mokslininkas Sadi Karno įrodė, kad didžiausias šiluminės mašinos naudingumo koeficientas būtų tuo atveju, jei darbiniu kūnu pasirinktume idealiąsias dujas. Idealios šiluminės mašinos naudingumo koeficientas $\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$; čia T_1 – šildytuvo temperatūra, T_2 – aušintuvo temperatūra absoliutinėje temperatūrų skalėje. Dėl labai mažo naudingumo koeficiento garo mašinos nebenaudojamos. Garvežiuose, garlaiviuose jas pakeitė vidaus degimo varikliai. Juose degant kurui susidariusios dujos (darbinė medžiaga) adiabatiškai besiplėsdamos atlieka reikalingą darbą kuro vidinės energijos sąskaita.

Atidirbusios dujos pašalinamos iš variklio į aplinką, todėl intensyvėjant variklių panaudojimui aplinka vis labiau teršiama degimo produktais, taip pat keičiamas atmosferos šiluminis balansas.

Galimas ir antras negrįžtamasis procesas, kai šaltesnis kūnas šildo šiltesnį. Tai atliekama panaudojant šaldytuvą ir oro kondicionierių (šilumos siurblį). Į šaldytuvą įdėtų produktų vidinės energijos dalis perduodama kambario orui. Tačiau šis procesas yra tik sudėtingesnio proceso dalis. Savaime jis nevyksta.



III. ELEKTRODINAMIKA

1. Elektrostatika

Visi kūnai sąveikauja visuotine trauka, o kai kurie jų ir dar viena sąveika – elektrine. Taip sąveikaujantys kūnai vadinami įelektrintais arba elektringais. Matematine išraiška elektrinės sąveikos (Kulono) dėsnis $F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$ yra analogiškas visuotinės traukos (gravitacijos) dėsniui $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$. **Kulono dėsnis** teigia, kad vakuume esančių taškinių įelektrintų kūnų elektrostatinės sąveikos jėgos modulis tiesiogiai proporcingas jų krūvių sandaugai ir atvirkščiai proporcingas atstumo tarp jų kvadratui. Abi šias sąveikas apibūdinanti jėga vienodai kinta keičiantis atstumui tarp kūnų. Abu dėsniai taikomi

kūnams, kuriuos galime laikyti materialiaisiais taškais. Visuotinė trauka priklauso nuo vienos kūnų savybės (inertiškumo), apibūdinamos mase m [kg], o elektrinė sąveika – nuo kitos savybės (elektringumo), apibūdinamos krūviu q [C]. Gravitacinė sąveika pasireiškia trauka, elektrinė – trauka ir stūma. Todėl elektringumas taip pat yra dvejopas: teigiamas ir neigiamas. Vienodai įelektrinti kūnai stumia vienas kitą, skirtingai – traukia.

Kūno elektringumas – kintanti savybė. Jos kitimą galima paaiškinti medžiagos sandara. Kiekvienas kūnas sudarytas iš molekulių, šios – iš atomų. Atomas susideda iš trijų rūšių dalelių. Protonai ir neutronai sudaro branduolį, o apie jį skrieja elektronai. Šių dalelių elektringumas nekintamas. Neutronas visada neįelektrintas. Protonas įelektrintas teigiamai, elektronas – neigiamai. Tai vienodai būdinga abiem dalelėms, todėl jų krūviai yra lygūs, tik priešingų ženklų: $q_p = |q_e| = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C. Ši krūvio reikšmė dažnai vadinama elementariuoju krūviu ir kartais laikoma nauju krūvio vienetu (pavyzdžiui, chemijoje). Kadangi apie atomo branduolį skriejančių elektronų skaičius lygus protonų skaičiui branduolyje, atomas yra neutralus. Tačiau atomas gali netekti arba prisijungti daugiau elektronų. Tada jis virsta įelektrinta dalele, vadinama jonu. Jono krūvis kinta šuoliškai. Pavyzdžiui, netekęs trijų elektronų atomas tampa trivalenčiu teigiamu jonu, kurio krūvis lygus trim elementariesiems krūviams, t. y. $4{,}8 \cdot 10^{-19}$ C. Prisijungęs papildomus elektronus, atomas tampa neigiamu jonu. Analogiški kitimai vyksta kūnų įelektrinimo metu. Netekęs tam tikro skaičiaus elektronų kūnas įsielektrina teigiamai, o gavęs perteklių – neigiamai. Kūnai paprastai įelektrinami trimis būdais: 1) suliečiant (trinant) du skirtingų medžiagų kūnus; 2) „perduodant" krūvį; 3) indukcijos būdu.

Pirmuoju būdu įsielektrina abu kūnai: vienas teigiamai, kitas – tiek pat neigiamai.

Įelektrinant kūną antruoju būdu, jis suglaudžiamas (sujungiamas laidininku) su įelektrintu kūnu. Tada šio elektringumas sumažėja, o neįelektrintas kūnas įsielektrina. Nors sulietus teigiamai įelektrintą kūną su neįelektrintu iš pastarojo dalis elektronų pereina į elektringą, formaliai sakoma, kad elektringas kūnas dalį savo krūvio perdavė neįelektrintam. Taigi „krūvio perdavimo" negalima suprasti paraidžiui, nes krūvis tėra tik fizikinis dydis.

Jeigu du neįelektrintus kūnus suglausime (sujungsime laidininku) ir prie vieno iš jų priartinsime įelektrintą kūną, jo veikiami abu kūnai įsielektrins. Artimesnis priartintam – priešingo ženklo krūviu,

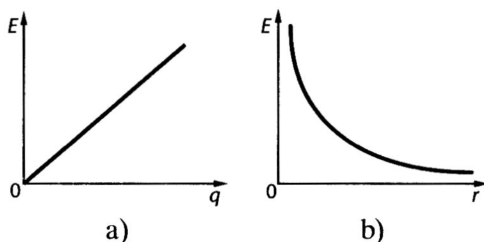
tolimesnis – to paties kaip ir priartintas kūnas. Kūnus atskyrus (atjungus laidininką), šie liks įelektrinti ir po kūno, kurio poveikiu buvo įelektrinti, atitraukimo. Toks įelektrinimo būdas vadinamas indukcija.

Skirtingų įelektrinimo reiškinių atveju uždarai kūnų sistemai galioja **krūvio tvermės dėsnis:** kintant atskirų kūnų įelektrinimui bendras sistemos krūvis nekinta: $q_1 + q_2 + \ldots + q_n = q'_1 + q'_2 + \ldots + q'_n$.

Kadangi gravitacinė konstanta G ($6{,}672 \cdot 10^{-11}$ $\mathrm{Nm^2/kg^2}$) skaitine verte daug kartų mažesnė už proporcingumo koeficientą k ($9 \cdot 10^9$ $\mathrm{Nm^2/C^2}$), dažniausiai elektrinė kūnų sąveika gerokai stipresnė už visuotinę jų trauką. Todėl paprastai nagrinėdami elektrinę sąveiką visuotinės traukos nepaisome. Be to, neatsižvelgiame į kūno masės kitimą įelektrinimo metu, nes elektrono masė apie 1800 kartų mažesnė už protono arba neutrono masę.

Elektringi kūnai veikia vienas kitą per tarpinę grandį – **elektrinį lauką**. Kiekvieną elektringą kūną supa neturinti medžiagos savybių materija – elektrinis laukas, veikiantis jame esančius kitus elektringus kūnus. Mes elektrinio lauko poveikio nejaučiame. Surasti jį galime tik turėdami elektringą kūną. Kad egzistuoja elektrinis laukas, įrodo elektrinio poveikio perdavimas baigtiniu greičiu. Vieno iš sąveikaujančių kūnų krūvio pokytį antrasis pajus tik praėjus tam tikram laikui. Kuo atstumas tarp kūnų didesnis, tuo daugiau vėluos veikimo pokytis. Priešingai, antrojo kūno poveikis pirmajam pakis iš karto, kintant pastarojo krūviui. Taigi šį laikotarpį elektringų kūnų sąveikai negalioja III Niutono dėsnis. Jei kūnai veiktų vienas kitą tiesiogiai, pirmojo įelektrinimo pokytį antrasis turėtų pajusti tą pačią akimirką. Elektrinis poveikis tuštumoje sklinda 300 000 km/s greičiu. Kadangi veikimo pokytis, lyginant su jo priežastimi, vėluoja, tai rodo, kad kūnai veikia vienas kitą ne tiesiogiai, bet per realią (materialią) tarpinę grandį. Elektringi kūnai sąveikauja ir tuštumoje – vadinasi, ši grandis nėra medžiaga. Taigi elektrinis laukas – materija, neturinti medžiagos savybių, supanti kiekvieną elektringą kūną ir veikianti į savo aplinką patekusį kiekvieną kitą elektringą kūną. Elektrinis laukas apibūdinamas vektoriniu fizikiniu dydžiu – elektrinio lauko stipriu $\vec{E}\left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}\right]$ bei skaliariniu dydžiu – potencialu φ [V]. **Elektrinio lauko stipris** yra lygus jėgos, veikiančios tam tikrame lauko taške esantį taškinį elektringą kūną, ir jo krūvio santykiui:

$\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q}$. Jei veikiamas teigiamai įelektrintas kūnas, $\vec{F}$ ir $\vec{E}$ kryptys sutampa, jei neigiamai – yra priešingos. Iš šios formulės negalime spręsti, nuo ko priklauso lauko stipris, nes elektringesnį kūną laukas veiks stipriau, o santykis $\frac{F}{q}$ liks nepakitęs. Jei elektrinis laukas yra taškinio kūno, tai $F=k\frac{q_1q_2}{r^2}$ įrašę į E apibrėžimo formulę gauname: $E=k\frac{q}{r^2}$. Ši formulė jau parodo, nuo ko priklauso taškinio įelektrinto kūno elektrinio lauko stipris. Jis tiesiogiai proporcingas to kūno krūviui ir atvirkščiai proporcingas atstumo nuo kūno iki lauko taško kvadratui. Šie dėsningumai pavaizduoti grafikuose $E = f(q)$ ir $E = f(r)$ (81 pav.).

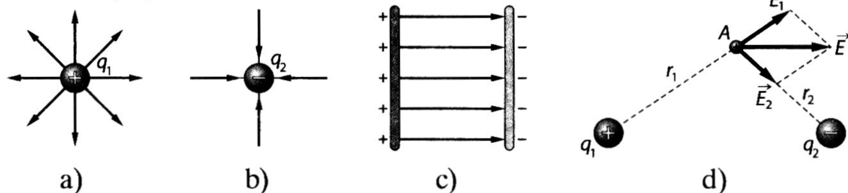


81 pav.

Norėdami įsivaizduoti šios neapčiuopiamos materijos pasiskirstymą, lauką vaizduojame linijomis. Linijos brėžiamos taip, kad jų tankis būtų proporcingas lauko stipriui, o liestinės bet kuriame taške sutaptų su lauko stiprio kryptimi (82 pav., *a, b*). Laukas, kurio linijos lygiagrečios (jų tankis vienodas), vadinamas vienalyčiu arba homogeniniu (82 pav., *c*).

Jei toje pačioje erdvėje yra keli elektriniai laukai, bendras jų stipris lygus atskirų laukų stiprių vektorinei sumai: $\vec{E}=\vec{E}_1+\vec{E}_2$ (82 pav., *d*). Šis teiginys vadinamas **superpozicijos principu.**

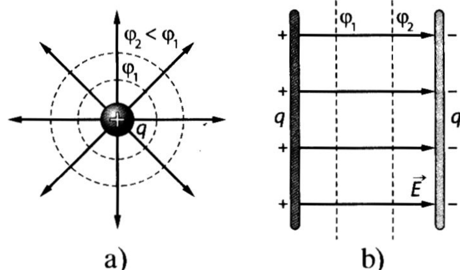
$q_1=2|q_2|$



82 pav.

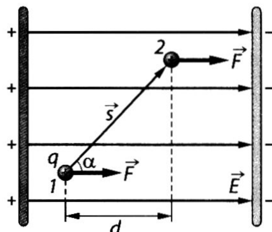
Kadangi elektrinis laukas veikia jame esantį įelektrintą kūną, jis gali priversti kūną judėti, t. y. atlikti darbą. Todėl elektrinio lauko ir jame esančio įelektrinto kūno sistema (jos būsena) yra apibūdinama potencine elektros energija W_p. Elektrinio lauko ir jame esančio kūno potencinės energijos santykis su to kūno krūviu priklauso tik nuo elektrinio lauko, todėl yra laikomas lauko charakteristika. Šis skaliarinis dydis vadinamas **elektrinio lauko potencialu** $\varphi = \frac{W_p}{q}$.

Potencialas matuojamas voltais $\left[1\,\mathrm{V} = \frac{1\,\mathrm{J}}{1\,\mathrm{C}}\right]$. Potencinė energija nustatoma konstantos tikslumu: konstantos reikšmė priklauso nuo sistemos būsenos tuo metu, kai jos energija lygi nuliui. Todėl potencialas nustatomas taip pat konstantos tikslumu. Potencialo apibrėžimo formulė neparodo, nuo ko priklauso elektrinio lauko potencialas. Jei laikome, kad labai toli nuo taškinio įelektrinto kūno jo lauko potencialas lygus nuliui, tai nuotoliu r potencialas $\varphi = k\frac{q}{r}$. Tada dviejų taškinių įelektrintų kūnų sąveikos energija $W_p = k\frac{q_1 q_2}{r}$. Kai skaičiuojame elektrinės sąveikos jėgą $F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$, $F = E \cdot q$ arba elektrinio lauko stiprį $E = k\frac{q}{r^2}$, į formules rašome tik skaitines krūvių vertes (nuo krūvių ženklų priklauso vektorių kryptys). Skaičiuodami $W_p = k\frac{q_1 q_2}{r}$, $W_p = \varphi \cdot q$ arba $\varphi = k\frac{q}{r}$, krūvius rašome su ženklu. Elektrinis laukas vaizduojamas ne tik elektrinio lauko linijomis, bet ir ekvipotencialinėmis (vienodo potencialo) linijomis (plokštumoje) arba paviršiais (erdvėje) (83 pav., *a, b*). Ekvipotencialinės linijos visada statmenos elektrinio lauko linijoms. Einant elektrinio lauko linijų kryptimi, lauko potencialas mažėja (tolstant nuo teigiamai įelektrinto kūno arba artėjant prie neigiamojo). Dviejų lauko taškų potencialų skirtumą vadiname **įtampa**: $U = \varphi_1 - \varphi_2$.



83 pav.

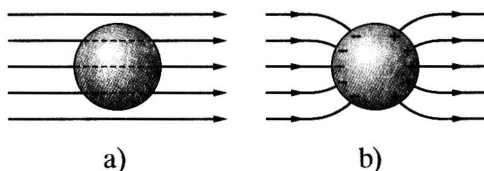
Elektrinis laukas (84 pav.), perkeldamas įelektrintą kūną, atlieka darbą $A = -\Delta W_p = -(W_{p2} - W_{p1}) = -q\ (\varphi_2 - \varphi_1) = qU$. Vienalyčio lauko atliktas darbas $A = \vec{F} \cdot \vec{s} = Fs\cos\alpha = Eqd$. Iš to galima spręsti, kad $U = Ed$. Vadinasi, vienalyčio elektrinio lauko stipris $E = \frac{U}{d}$; čia U – įtampa tarp dviejų lauko taškų, d – atstumas tarp ekvipotencialinių paviršių, einančių per tuos taškus. Remiantis šiuo sąryšiu, apibrėžiamas elektrinio lauko stiprio vienetas SI sistemoje – voltas metrui $\left(\frac{\text{V}}{\text{m}}\right)$. Vienalyčio elektrinio lauko, kurio dviejų linijos taškų, esančių 1 metro atstumu, potencialai skiriasi 1 voltu, stipris laikomas lygus $1\frac{\text{V}}{\text{m}}$. Nors SI sistemoje darbas ir energija matuojami džauliais (J), atomo ir branduolio fizikoje plačiai naudojamas energijos (darbo) vienetas elektronvoltas (eV). Vienam elektronvoltui lygus darbas, kurį elektrinis laukas atlieka, perkeldamas elektroną iš vieno taško į kitą, kai taškų potencialai skiriasi 1 voltu: $1\ \text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 1\ \text{V} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$. Nevienalyčio elektrinio lauko stipris yra lygus potencialo išvestinei atstumo linijos kryptimi atžvilgiu: $E = \varphi'_d$.



84 pav.

Kai įelektrintas kūnas juda ekvipotencialine linija, elektrinis laukas darbo neatlieka. Elektrinio lauko darbui taip pat neturi įtakos perkeliamo įelektrinto kūno judėjimo trajektorija – jis priklauso tik nuo to kūno krūvio ir įtampos tarp pradinio bei galinio taškų. Jeigu judantį įelektrintą kūną veikia vien elektrinis laukas, tai, kintant W_p, kinta to kūno kinetinė energija W_k. Tokiam kitimui galioja **elektros energijos tvermės dėsnis**: $W_{p1} + W_{k1} = W_{p2} + W_{k2}$.

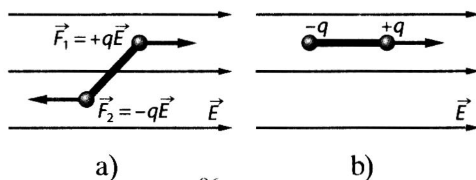
Pagal tai, kaip medžiagos funkcionuoja elektriniame lauke, jas skirstome į laidininkus ir dielektrikus (nelaidininkus arba izoliatorius). Laidininkai – medžiagos, kuriose yra elektringųjų dalelių (elektronų arba jonų), galinčių judėti po medžiagą. Patalpinto į elektrinį lauką laidininko laisvąsias elektringąsias daleles elektrinis laukas priverčia persiskirstyti (85 pav.). Dėl to atskiros kūno vietos įsielektrina. Elektrinio lauko sukelti kitimai nustos vykti tada, kai



85 pav.

atsiradusio vidinio elektrinio lauko ir išorinio lauko bendras stipris taps lygus nuliui. Tai ir yra **elektrostatinės apsaugos principas**. Metaliniu gaubtu apgaubto prietaiso išorinis elektrostatinis laukas neveikia. Paviršiaus įelektrinimas pasiskirsto taip, kad prie paviršiaus esančios bendro lauko linijos taptų statmenos kūno paviršiui. Nors nusistovėjus būsenai laidininko viduje bendro lauko stipris lygus nuliui, negalima teigti, kad lauko laidininke nėra, nes lauko potencialas įvairiose kūno vietose bus toks pat, kaip paviršiuje, t. y. visur vienodas. Lauko stipris šalia įelektrinto laidininko paviršiaus didesnis ten, kur paviršius kreivesnis. Ypač jis stiprus ties smaigaliais, nuo kurių nutekėdami krūviai sukelia elektrinį vėją arba jonizuoja dujas.

Dielektrikuose laisvų elektringųjų dalelių nėra. Pagal sandarą dielektrikai skirstomi į polinius ir nepolinius. Polinių dielektrikų molekulės yra **dipoliai**, t.y. viena jų dalis yra teigiama, o kita – tiek pat neigiama. Įprastas dipolių išdėstymas medžiagoje yra atsitiktinis (86 pav., *a*). Veikiantis išorinis elektrinis laukas dipolius pasuka (orientuoja) (86 pav., *b*). Dėl to priešingi dielektriko paviršiai įsielektrina, bet ne tiek, kad kompensuotų išorinio lauko veikimą. Todėl dielektrikas tik susilpnina elektrinį lauką. Nors nepolinio dielektriko dalelės nėra dipoliai, veikiamos išorinio elektrinio lauko jos poliarizuojasi ir, analogiškai poliniam, susilpnina išorinio lauko veikimą. Ši dielektrikų savybė apibūdinama dielektrine skvarba ε, kuria laikome elektrinio lauko stiprių vakuume ir dielektrike santykį: $\varepsilon = \frac{E_0}{E}$. Dielektrinė skvarba parodo, kiek kartų dielektrikas susilpnina išorinį elektrinį lauką. Dielektrinė skvarba neturi matavimo



86 pav.

vienetų ir nurodoma tik skaičiumi. Taigi, jei nagrinėjami įelektrinti kūnai nėra tuštumoje ir juos supa dielektrikas, tai $E = k\frac{q}{\varepsilon r^2}$, $F = k\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}$, $\varphi = k\frac{q}{\varepsilon r}$, $W_p = k\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r}$. Nors elektrinio lauko veikiamo kūno atskiros paviršiaus vietos įsielektrina, kūnas lieka neutralus. Prie įelektrinto kūno esančio neutralaus kūno artimesnė pusė visada įsielektrins priešingai, todėl ji visuomet traukiama stipriau, negu stumiama priešinga tiek pat įelektrinta pusė. Dėl šios priežasties neutralų kūną traukia tiek teigiamai, tiek neigiamai įelektrintas kūnas. Tačiau veikimo į atskiras jo dalis jėgų atstojamoji yra maža, todėl toks veikimas būdingas tik lengviems kūnams (patrintas į plaukus pripūstas balionas prilimpa prie lubų). Dėl panašių priežasčių daug didesniu atstumu nuo kūno (lyginant su jo matmenimis) esantis elektrinis laukas, į kurį patenka tas kūnas, praktiškai lieka nepakitęs.

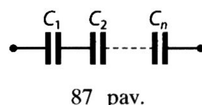
Koks bus elektrinio lauko potencialas įelektrinto laidininko paviršiuje (ir bet kuriame kitame jo taške), priklauso ne tik nuo kūno įelektrinimo (jo krūvio), bet ir nuo paties kūno gebėjimo kaupti elektros krūvį, t. y. priimti ar atiduoti elektringas daleles. Tokia kūno savybė apibūdinama **elektrine talpa** C. Šį fizikinį dydį nusako laidininko krūvio ir potencialo santykis: $C = \frac{q}{\varphi}$. Elektrinė talpa matuojama faradais: $1\,\mathrm{F} = \frac{1\,\mathrm{C}}{1\,\mathrm{V}}$. Laidininko elektrinė talpa priklauso nuo jo matmenų (paviršiaus ploto), formos, nuo jį supančios terpės dielektrinės skvarbos. Laidaus rutulio elektrinė talpa $C = \frac{\varepsilon R}{k} = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R$; čia R – rutulio spindulys, $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}$ – elektrinė konstanta, kuria išreiškiamas Kulono dėsnio proporcingumo koeficientas $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$. Jeigu netoli įelektrinto laidininko yra neutralus kūnas, jame įvykstančių pokyčių dėka kinta elektrinis laukas ir įelektrinto kūno paviršiuje, t. y. kinta jo potencialas. Todėl atskiro laidininko elektrinė talpa priklauso ne tik nuo paties laidininko, bet ir nuo jį

supančių kūnų išsidėstymo. Dviejų vienodo dydžio priešingo ženklo krūviais įelektrintų laidininkų elektrinis laukas egzistuoja tik tarp šių kūnų, todėl jų elektrinė talpa jau nepriklauso nuo aplinkos. Praktikoje plačiai naudojama tokia dviejų laidininkų sistema vadinama **kondensatoriumi**. Pagal apibrėžimą, kondensatoriaus talpa laikome vieno iš laidininkų krūvio didumo ir įtampos tarp laidininkų santykiui lygų fizikinį dydį: $C = \frac{q}{U}$. Jeigu vieną laidininką įelektrinus 1 C teigiamu krūviu, o kitą tiek pat neigiamu, tarp jų susidaro 1 V įtampa, tai kondensatoriaus talpa lygi 1 F. Kondensatoriaus talpa priklauso tik nuo laidininkų matmenų, formos, tarpusavio padėties bei juos skiriančio dielektriko. Dviejų plokščių kondensatoriaus elektrinė talpa $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$; čia S – plokščių persidengimo (bendras) plotas, d – atstumas tarp jų, ε – plokštes skiriančio dielektriko skvarba. Kondensatoriaus laidininkų įelektrinimo procesas dažnai vadinamas kondensatoriaus įkrovimu. Įkraunant kondensatorių reikia atlikti darbą, kad būtų nugalėtas įelektrinamų laidininkų pasipriešinimas įelektrinimo didinimui. Kadangi įkrauto kondensatoriaus laidininkai sąveikauja, jie gali atlikti darbą. Vadinasi, kondensatorius „turi“ energijos. Kodensatoriaus energija gali būti nusakoma šiomis formulėmis: $W_p = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}$. Plokščiojo kondensatoriaus energija gali būti nusakoma taip: $W_p = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S(E \cdot d)^2}{2d} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} S \cdot d = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} V$, nes S ir d sandauga yra lygi erdvės tarp kondensatoriaus plokščių tūriui. Kondensatoriaus energiją galima laikyti tarp jo plokščių esančio elektrinio lauko energija.

Įkrauto ir atjungto nuo išorinio elektros šaltinio kondensatoriaus krūvis, keičiant atstumą tarp kondensatoriaus plokščių arba jų persidengimo plotą bei jas skiriantį dielektriką, nekinta, bet kinta jo talpa ir įtampa.

Įkrauto ir neatjungto nuo išorinio elektros šaltinio kondensatoriaus įtampa, keičiant atstumą tarp kondensatoriaus plokščių arba jų persidengimo plotą bei jas skiriantį dielektriką, nekinta, bet kinta jo talpa ir krūvis.

Kondensatoriai elektros grandinėse jungiami į baterijas. Yra du jungimo būdai: nuoseklusis ir lygiagretusis.

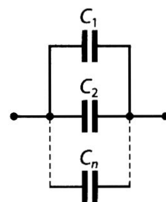


87 pav.

Nuosekliajam jungimui (87 pav.) būdingi tokie dėsningumai.

1) Visų nuosekliai sujungtų kondensatorių krūviai vienodi ir lygūs krūviui, kuriuo pakrauta baterija:

$$q_1 = q_2 = \ldots = q_n = q.$$



88 pav.

2) Įtampa baterijos gnybtuose lygi įtampų kiekvieno kondensatoriaus gnybtuose sumai:

$$U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n.$$

3) Bendrai baterijos talpai atvirkščias dydis lygus kondensatorių talpoms atvirkščių dydžių sumai:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n}.$$

Lygiagrečiajam jungimui (88 pav.) būdingi tokie dėsningumai.

1) Krūvis, kuriuo pakrauta baterija, lygus kondensatorių krūvių sumai:

$$q = q_1 + q_2 + \ldots + q_n.$$

2) Įtampa kiekvieno kondensatoriaus gnybtuose vienoda ir lygi įtampai baterijos gnybtuose:

$$U_1 = U_2 = \ldots = U_n = U.$$

3) Bendra baterijos talpa lygi kondensatorių talpų sumai:

$$C = C_1 + C_2 + \ldots + C_n.$$

2. Nuolatinė srovė

Kadangi laidininkuose yra laisvų elektringųjų dalelių, juose sukurtas elektrinis laukas sukelia kryptingą dalelių judėjimą. Šis reiškinys vadinamas elektros srovės tekėjimu arba tiesiog elektros srove. Kad laidininku teka elektros srovė, galima spręsti iš trijų šiam reiškiniui būdingų veikimų: šiluminio, cheminio, magnetinio.

1) Laidininkas, kuriuo teka elektros srovė, šyla (šiluminis veikimas).

2) Kai srovė teka elektrolitais (druskų, rūgščių, šarmų vandeniniais tirpalais), iš jų išsiskiria gryna cheminė medžiaga (cheminis veikimas).

3) Laidas, kuriuo teka elektros srovė, veikia magnetinę rodyklę (magnetinis veikimas).

Elektros srovės tekėjimą apibūdina fizikinis dydis – **srovės stipris**. Elektros srovės stipriu laikome laidininko skerspjūviu pratekėjusių dalelių krūvio ir laiko, per kurį jos pratekėjo, santykį: $I = \frac{q}{t}$. Srovės stipris SI vienetų sistemoje matuojamas vienu iš septynių bazinių SI sistemos vienetų – amperais (A). Jis apibrėžiamas remiantis nuolatinės elektros srovės laidininkams būdinga magnetine sąveika. Vienas amperas – tai stipris tokios srovės, kuriai tekant dviem lygiagrečiais be galo ilgais laidais, esančiais vakuume 1 metro atstumu vienas nuo kito, kiekvieną vieno laido metrą kitas laidas veikia $2 \cdot 10^{-7}$ N jėga. Iš elektros srovės stiprio apibrėžimo gauname, kad $q = It$. Remiantis šiuo sąryšiu, apibrėžiamas krūvio vienetas kulonas (C). Vienam kulonui lygus dalelių, pratekėjusių laidininko skerspjūviu per 1 sekundę, krūvis, tekant 1 A stiprio srovei: $1\,\mathrm{C} = 1\,\mathrm{A} \cdot 1\,\mathrm{s}$.

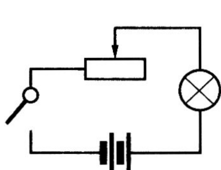
Elektros srovės tekėjimui turi įtakos ne tik elektrinis laukas, kuris priverčia kryptingai judėti daleles, bet ir laidininkas, trukdantis joms judėti. Šią laidininko savybę nusakome fizikiniu dydžiu – **varža** *R*. Apie laidininko varžą sprendžiame iš įtampos *U* laidininko galuose ir juo tekančios srovės stiprio *I* santykio: $R = \frac{U}{I}$. Varža matuojama omais (Ω). Laidininko, kurio galuose esant 1 volto įtampai juo teka 1 ampero stiprio elektros srovė, varža prilyginama 1 omui: $1\,\Omega = \frac{1\,\mathrm{V}}{1\,\mathrm{A}}$. Prietaisas varžai matuoti yra ommetras: jis iš karto parodo laidininko varžą.

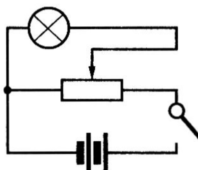
Laidininko varža priklauso nuo medžiagos, iš kurios jis sudarytas, savybių bei laidininko matmenų (ilgio ir skerspjūvio ploto): $R = \rho\frac{l}{S}$. Medžiagos savybės, nuo kurių priklauso varža, nusakomos savitąja medžiagos varža $\rho\,[\Omega \cdot \mathrm{m}]$; savitoji varža parodo, kokia būtų tos medžiagos kubo su 1 m kraštine varža.

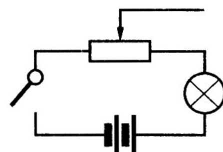
Prietaisas grandinės elektrinei varžai keisti vadinamas **rezistoriumi** (varžu) ir schemose žymimas simboliu —▭—. Įtaisai grandinės varžai reguliuoti yra **reostatai**: jie skirstomi (pagal laidininkus) į metalinius, skystinius ir anglinius. Metalinis reostatas su šliaužik-

liu vadinamas šliaužikliniu reostatu ir žymimas simboliu .

Šliaužiklinio reostato jungimo į elektrines grandines būdai parodyti schemose (89 pav., *a, b, c*). (89 pav., *a*) pavaizduotas šliaužiklinis reostatas reguliuoja srovės stiprį grandinėje. 89 pav., *b* jis tolydžiai reguliuoja įtampą. Taip į grandinę įjungtas šliaužiklinis reostatas vadinamas **potenciometru.** 89 pav., *c* šliaužiklinis reostatas tik padidina grandinės varžą (rezistoriaus vaidmuo).

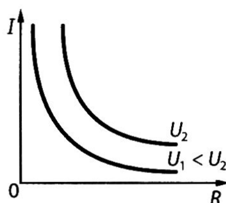

a)


b)

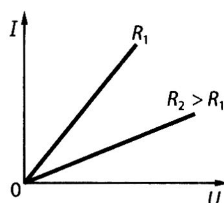

c)

89 pav.

Kadangi srovės tekėjimas priklauso nuo jį sukeliančio elektrinio lauko (įtampos) bei laidininko (varžos), taikydami varžos apibrėžimą gauname, kad $I = \frac{U}{R}$. Ši funkcinė priklausomybė yra **Omo dėsnis grandinės daliai** (90 pav., *a, b*).



a)



b)

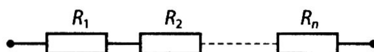
90 pav.

Laidininkai elektros grandinėse jungiami dviem būdais: nuosekliai ir lygiagrečiai.

Nuosekliajam laidininkų jungimui (91 pav.) būdingi tokie dėsningumai.

1) Elektros srovės stipris grandinės dalyje ir atskiruose laidininkuose yra vienodas:

$$I = I_1 = I_2 = \ldots = I_n.$$



91 pav.

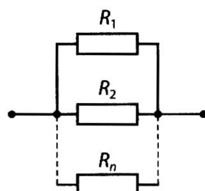
2) Įtampa grandinės dalies galuose yra lygi įtampų atskirų laidininkų galuose sumai:

$$U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n.$$

3) Bendra grandinės dalies varža lygi atskirų laidininkų varžų sumai:

$$R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n.$$

Lygiagrečiajam laidininkų jungimui (92 pav.) būdingi tokie dėsningumai.



92 pav.

1) Elektros srovės stipris neišsišakojusioje grandinės dalyje yra lygus srovių stiprių laidininkuose sumai:

$$I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n.$$

2) Įtampa grandinės dalyje ir atskirų laidininkų gnybtuose yra vienoda:

$$U = U_1 = U_2 = \ldots = U_n.$$

3) Bendrai laidininkų varžai atvirkščias dydis yra lygus atskirų laidininkų varžoms atvirkščių dydžių sumai:

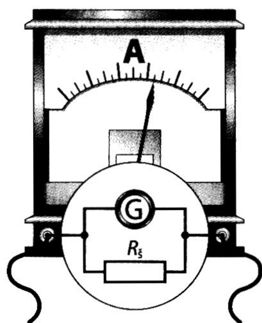
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}.$$

Srovės stipris grandinėje matuojamas **ampermetru**, o įtampa – **voltmetru**. Ampermetras į grandinę jungiamas nuosekliai. Jo varža labai maža. Voltmetras jungiamas lygiagrečiai prie tų grandinės taškų, tarp kurių esančio elektrinio lauko įtampą norime išmatuoti. Jo varža labai didelė. Iš tiesų tiek ampermetras, tiek voltmetras yra gaunami iš silpnoms srovėms jautraus prietaiso – galvanometro, praplečiant jo matavimo ribas.

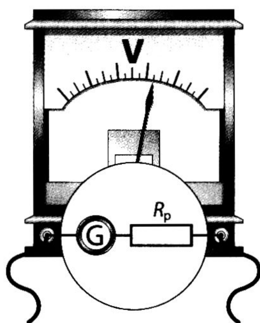
Ampermetras gaunamas prie galvanometro lygiagrečiai prijungiant tam tikrą rezistorių – šuntą (93 pav.). Norint praplėsti galvanometro ribas, šunto varža turi būti $R_{\check{s}} = \dfrac{R_G}{n-1}$; čia n – skaičius, nurodantis, kiek kartų praplečiamos matavimo ribos.

Voltmetras gaunamas prie galvanometro nuosekliai prijungiant priešvaržę (94 pav.). Priešvaržės varža turi būti $R_P = R_G\,(n - 1)$; čia R_G – galvanometro varža.

Tik teoriškai, kai ampermetras ir voltmetras laikomi idealiais ($R_A = 0\ \Omega$, $R_V = \infty\ \Omega$), prietaisų įjungimas nekeičia matavimo rezultatų. Realiai dėl pačių prietaisų įjungimo į grandinę matuojamų dydžių vertės šiek tiek sumažėja.



93 pav.



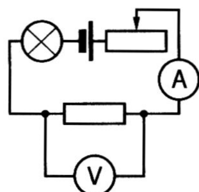
94 pav.

Elektros srovė įvairiose terpėse. Viena laidininkų grupė yra **metalai.** Įprastomis sąlygomis jie visi, išskyrus gyvsidabrį, yra kietos medžiagos. Metalams būdinga polikristalinė struktūra. Susidarant medžiagai, nuo metalo atomų atitrūksta kai kurie išorinio sluoksnio elektronai. Dėl tarpusavio sąveikos ir sąveikos su laisvaisiais elektronais teigiami jonai, išsidėstydami tam tikra tvarka, tampa kristalinės gardelės mazgais, tarp kurių po visą medžiagą gali judėti laisvieji elektronai. Nesant išorinio elektrinio lauko, laisvieji elektronai juda chaotiškai. Atsiradus tokiam laukui, jo veikiami elektronai juda greitėdami nuo vieno iki kito susidūrimo su kristalinės gardelės mazgais. Kadangi šie susidūrimai labai dažni (laisvasis elektrono kelias labai mažas), be to, vieni elektronai sustabdomi vieną akimirką, kiti – kitą, susidaro tolyginio jų judėjimo įspūdis. Susidurdami elektronai „perduoda“ savo kinetinę energiją teigiamiems jonams. Dėl šios priežasties didėja elektros srovės laidininko vidinė energija, jis šyla, kartu šildydamas kitus kūnus. Laidininko išskirtą šilumos kiekį galime išreikšti taip: $Q = Uq = UIt = \frac{U^2}{R}t = I^2Rt.$

Šių formulių prasmė įvairi. Visų pirma tai elektrinio lauko, sukeliančio elektros srovę, darbas jos tekėjimo metu. Antra – tai elektros srovės (kryptingai judančių elektronų) darbas išjudinant kristalinės gardelės mazgus. $A = Uq$ arba $A = UIt$ gali būti laikoma sunaudota elektros (elektrinio lauko sąveikos su įelektrintomis dalelėmis) energija, o kartu ir gauta šilumine (šildytuve), mechanine (elektros variklyje), šviesos (elektros lemputėje) energija. Įprasta, kad tekanti elektros srovė sukelia ne tik reikalingą reiškinį, bet ir kitus reiškinius. Todėl našiai panaudotą energiją su visa energija

sieja įrenginio naudingumo koeficientas: $W_n = \eta W$. Elektros srovė bei elektriniai prietaisai apibūdinami fizikiniu dydžiu – **galia**: $P = \frac{A}{t} = UI = \frac{U^2}{R} = I^2R$. Nors darbo arba energijos vienetai SI vienetų sistemoje yra džauliai (J), dažnai elektros energija matuojama kilovatvalandėmis (kWh). Iš vato apibrėžimo gauname, kad 1 J = 1 Ws (vatsekundė). Tai 1 kWh = 10^3 Wh = 10^3 W · 3600 s = 3,6 · 10^6 Ws = = 3,6 · 10^6 J = 3,6 MJ.

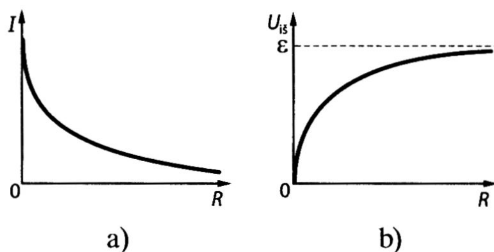
Jeigu du vienodo dydžio, bet priešingo ženklo krūviais įelektrintus kūnus sujungsime laidininku, tų kūnų elektrinis laukas sukels laidininke elektros srovę. Jos tekėjimo metu laidininkų įelektrinimas mažės, ir jie išsielektrins. Norint, kad elektros srovė tekėtų nenutrūkstamai, reikia nuolat atstatinėti išsielektrinančių kūnų įelektrinimą. Įelektrinantis įrenginys vadinamas elektros srovės arba elektros energijos šaltiniu. Formaliai sakoma, kad elektros srovės šaltinis yra įrenginys, kuriame pašalinės jėgos, t. y. nežinia kas atskiria teigiamas daleles nuo neigiamų ir, nugalėdamas tarpusavio trauką, perkelia į tam tikras vietas, vadinamas šaltinio poliais. Poliai – du minėti teigiamai ir neigiamai įelektrinti kūnai. Šaltinis apibūdinamas fizikiniu dydžiu – **elektrovara $\mathcal{E}$**. Juo laikome pašalinių jėgų darbo, atlikto įelektrinant polius, ir krūvio, kuriuo jie įelektrinami, santykį: $\mathcal{E} = \frac{A}{q}$. Elektrovara matuojama tais pačiais vienetais, kaip ir įtampa, t. y. voltais (V); įtampos ir elektrovaros apibrėžimas skiriasi tik tuo, kad apibrėžiant įtampą kalbama apie elektrinio lauko darbą, o apibrėžiant elektrovarą – apie pašalinių jėgų darbą. Taigi galima sakyti, kad šaltinyje kokios nors rūšies (pvz., šiluminė, cheminė, mechaninė, šviesos ir kt.) energija virsta elektros energija.



95 pav.

Elektros energijos šaltinis, elektros energijos imtuvai bei jungiamieji laidai sudaro uždarą grandinę (95 pav.). Tekančios elektros srovės stipris grandinėje priklauso nuo šaltinio ir energijos imtuvų savybių. Šią priklausomybę parodo **Omo dėsnis uždarai grandinei**: $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$; čia R – išorinės

grandinės dalies (imtuvų) varža, r – šaltinio vidinė varža. Vienoje grandinėje gali būti ne tik keli imtuvai, bet ir keli šaltiniai. Šaltiniai jungiami į baterijas dviem būdais: nuosekliai arba lygiagrečiai. Nuosekliai sujungtų šaltinių baterijos $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + ... + \mathcal{E}_n$ ir $r = r_1 + r_2 + ... + r_n$. Tuo atveju, kai lygiagrečiai sujungtų šaltinių elektrovaros vienodos, baterijos elektrovara lieka tokia pat kaip vieno šaltinio $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = ... = \mathcal{E}_n$, o bendrai baterijos vidinei varžai atvirkščias dydis lygus šaltinių varžoms atvirkščių dydžių sumai: $\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + ... + \frac{1}{r_n}$. Norint padidinti baterijos galią šaltiniai jungiami lygiagrečiai, o norint padidinti elektrovarą – nuosekliai. Iš Omo dėsnio uždarai grandinei ir grandinės daliai matyti, kad $\mathcal{E} = IR + Ir$ arba $\mathcal{E} = U_{iš} + U_{vid}$. Kartais įtampa grandinės dalies galuose siejama su įtampos kritimu, nes, praėjus šią grandinės dalį, likusioje dalyje ji yra tokia verte sumažėjusi. Tuo atveju, kai grandinė atvira ($R = \infty$), srovė joje neteka ($I = 0$), o įtampa šaltinio gnybtuose lygi elektrovarai: $U_{iš} = \mathcal{E}$. Įtampos kritimo nėra. Kai išorinės dalies $R = 0$, tada I yra didžiausia ir vadinama **trumpojo jungimo srove**: $I = \frac{\mathcal{E}}{r}$. Trumpojo jungimo atveju $U_{iš} = 0$, o įtampos kritimas vidinėje grandinės dalyje (šaltinyje) lygus elektrovarai: $U_{vid} = \mathcal{E}$. Iš Omo dėsnių matyti, kad $U_{iš} = \mathcal{E} - U_{vid}$. Kuo mažesnė R, tuo didesnė I ir kartu įtampos kritimas šaltinyje. Todėl didėjant išorinės grandinės dalies varžai nuo 0 iki ∞ Ω srovės stipris joje mažėja nuo trumpojo jungimo srovės iki 0 A, o įtampa galuose (šaltinio gnybtuose) didėja nuo 0 V iki šaltinio elektrovaros. Šias priklausomybes vaizduoja pateikti grafikai (96 pav., *a, b*). Kadangi realiai jungiamųjų laidų varža yra maža, bet nelygi nuliui, trumpojo jungimo atveju srovės stipris, įtampos kritimas juose bei išsiskiriantis šilumos



96 pav.

kiekis būna didžiausias. Todėl trumpojo jungimo atveju gali kilti gaisrai. Nuo trumpojo jungimo apsaugo **saugikliai**, kurie elektros grandinėse jungiami nuosekliai ir žymimi —▭—. Saugikliai yra lydieji ir automatiniai. Jie apskaičiuoti maksimaliai leistinai elektros srovei, kurią viršijus saugiklis išsilydo arba automatiškai išsijungia, nutraukdamas elektros srovės tekėjimą grandinėje.

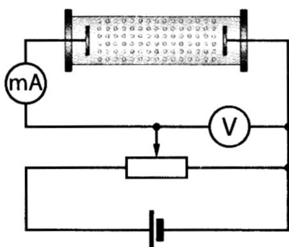
Elektros srovei laidūs ne tik metalai, bet ir vandeniniai **elektrolitų** (druskų, rūgščių, bazių) **tirpalai**. Tirpinamos medžiagos kristalus arba molekules vandens molekulės suardo į jonus. Šis procesas vadinamas tirpinamos medžiagos disociacija į jonus. Kai kurie tirpale esantys jonai gali rekombinuoti atgal į molekules. Tirpstant medžiagai, tam tikru momentu nusistovi dinaminė pusiausvyra tarp disociacijos ir rekombinacijos. Kuo labiau koncentruotas tirpalas, tuo didesnė ir jonų koncentracija. Taip pat ji didėja kylant temperatūrai, nes stiprėja disociacija. Taigi elektrolitų tirpalų varža mažėja kylant tirpalo temperatūrai. Esant elektriniam laukui, elektrolitų tirpaluose teigiamieji jonai juda viena kryptimi, o neigiamieji – priešinga kryptimi. Jei elektrolite yra teigiamų metalo jonų, tai jie, tekant elektros srovei priartėję prie neigiamai įelektrinto elektrodo (katodo) ir gavę trūkstamą skaičių elektronų, ant jo nusėda. Šis procesas vadinamas **elektrolize**. Elektrolizės metu išsiskyrusios iš elektrolito tirpalo medžiagos masė yra tiesiogiai proporcinga srovės stipriui ir jos tekėjimo laikui: $m = kIt$ arba $m = kq$.

Tai **elektrolizės dėsnis**. $k\left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{C}}\right]$ – proporcingumo koeficientas, vadinamas **elektrocheminiu ekvivalentu**. Jis tiesiogiai priklauso nuo išsiskiriančios medžiagos molio masės M ir atvirkščiai – nuo jos valentingumo n: $k = \frac{1}{F}\cdot\frac{M}{n}$. Įrašę į elektrolizės (Faradėjaus) dėsnį, gauname: $m = \frac{1}{F}\cdot\frac{M}{n}It$; čia $F = 9{,}65\cdot10^4\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{mol}}$ – Faradėjaus konstanta, lygi jonų krūviui, kuriam pratekėjus pro elektrolitą išsiskiria vienas molis vienvalentės medžiagos. Elektrolizė plačiai taikoma padengiant gaminius įvairiais metalais, siekiant apsaugoti juos nuo korozijos, gaminant juvelyrinius dirbinius. Šis procesas vadinamas **galvanostegija**. Tikslių metalinių kopijų gamyba elektrolizės būdu vadinama **galvanoplastika**. **Metalų rafinavimas** – grynųjų metalų

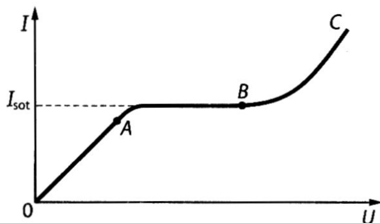
gavimas, kai elektrodai padaryti iš to paties metalo, kurio jonų yra elektrolite. Anodas elektrolizės metu tirpsta – pereina į elektrolitą, o ant katodo nusėda to paties metalo jonai iš elektrolito.

Įprastinėmis sąlygomis **dujos** yra dielektrikas, tačiau pakaitintos jos tampa laidžios. Aukštesnėje temperatūroje dujų molekulės juda intensyviau, ir kai molekulių kinetinės energijos tampa didesnės už darbą, reikalingą jonizuoti vienai kitą, susidūrusios molekulės išmuša viena iš kitos elektronus. Dalį laisvųjų elektronų gali prisijungti neutralios molekulės, tapdamos neigiamais jonais. Dujas gali jonizuoti ir ultravioletiniai bei rentgeno spinduliai. Taip dujose gali atsirasti laisvųjų elektronų ir teigiamų bei neigiamų jonų. Dujos virsta laidininku. Elektros srovės tekėjimas dujomis vadinamas **išlydžiu**.

Jei potenciometru (šliaužikliniu reostatu) didinsime įtampą tarp elektrodų vamzdelyje (žr. 97 pav.) veikdami jonizatoriumi jame esančias dujas, tai iš pradžių srovės stipris didės proporcingai įtampai (galios Omo dėsnis – 98 pav. grafiko $0A$ dalis). Taip yra todėl, kad pradžioje dalis jonizatoriaus sukurtų jonų ir elektronų rekombinuoja atgal į neutralius atomus arba molekules. Didinant įtampą (stiprėjant elektriniam laukui), vis daugiau jonų ir elektronų sudaro srovę ir mažiau rekombinuoja. Kai visi sukurti jonai ir elektronai sudaro srovę ir nebespėja rekombinuoti, pasiekiama soties srovė. Jei įtampa toliau didinama, srovės stipris nustoja didėti. Norint padidinti soties srovę, reikia stiprinti jonizatoriaus galią (poveikį dujoms). Kadangi nustojus veikti jonizatoriui išlydis nutrūksta, jis vadinamas **nesavaiminiu** (98 pav. grafiko $0AB$ dalis). Toliau didindami įtampą matome, kad srovės stipris vėl pradeda didėti. Tuo metu, nustojus veikti jonizatoriui, išlydis nenutrūksta, todėl jis



97 pav.



98 pav.

vadinamas **savaiminiu** (98 pav. grafiko *BC* dalis). Jonizatorius nereikalingas dėl to, kad elektrinio lauko pagreitinti elektronai, susidurdami su molekulėmis, „turi“ pakankamai energijos joms jonizuoti: $eU=\frac{mv^2}{2}$; čia e – elektrono krūvis, m – elektrono masė. Vien dėl smūginės jonizacijos savaiminis išlydis negalėtų vykti, nes visi atsiradę elektronai pasiektų anodą ir procesas turėtų nutrūkti. Tačiau taip nėra, nes pagreitėję teigiami jonai, smogdami į katodą, išmuša iš jo elektronus; be to, dažnai katodas spinduliuoja elektronus dėl įkaitimo, t. y. vyksta termoelektroninė emisija. Skirtingomis sąlygomis gali vykti šių rūšių savaiminiai išlydžiai: elektros kibirkštis, elektros lankas, rusenantis bei vainikinis išlydis. Savaiminį išlydį galima gauti trimis būdais: 1) didinant įtampą; 2) artinant elektrodus; 3) praretinant dujas. Pirmuoju ir antruoju atvejais stiprėja elektrinis laukas: $E=\frac{U}{d}$. Trečiuoju atveju didėja elektronų laisvasis kelias.

Elektros kibirkštis gaunama, kai šaltinis sukuria pakankamai aukštą įtampą, bet jo galia nėra didelė. Kai dujos tampa laidžios, tekant srovei elektrodų įelektrinimas mažėja, nes šaltinis nesugeba atstatyti įelektrinimo. Dėl to išlydis nutrūksta. Tačiau greitai įtampa padidėja iki reikiamos savaiminiam išlydžiui ir procesas kartojasi. Kadangi sąlygos dujoms jonizuotis nėra vienodos įvairiose vietose, išlydžio metu atsiranda laužytas laidus kanalas. Dėl šių priežasčių elektros kibirkštis (žaibas) nėra tiesi linija.

Elektros lankui gauti reikalingas pakankamos galios šaltinis. Uždegant elektros lanką iš pradžių elektrodai suglaudžiami. Grandine teka stipri elektros srovė (sąlygos artimos trumpajam jungimui). Stipriausiai kaista elektrodų sąlyčio vieta, nes ten kontaktas prasčiausias (varža didžiausia). Įkaitus elektrodams, prasideda termoelektroninė emisija, kuri palaiko srovės tekėjimą atitolinus elektrodus.

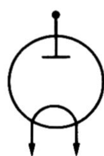
Kai kada stipriai įelektrintų smailių laidininkų aplinkoje galima pastebėti švytėjimą. Tai vykstančio vainikinio išlydžio rezultatas. Šiuo atveju įelektrinto kūno elektrinis laukas nėra vienalytis, jis stipriausias prie smailiausių paviršių vietų. Todėl tose vietose gali vykti smūginė jonizacija, o tolimesnėse – ne. Vainikinis išlydis, jau senovėje pavadintas švento Elmo ugnelėmis, gali gaubti aukštų smailių

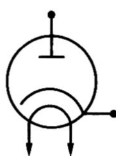
objektų viršūnes prieš audrą arba jos metu. Taip pat šis išlydis gali supti aukštosios įtampos laidus. Dėl jo susidaro elektros energijos nuostoliai. Siekiant jų išvengti, reikia didinti laidų skersmenį (mažinti paviršiaus kreivumą).

Savaiminį išlydį galima sukelti ir nedidinant įtampos tarp elektrodų, neartinant jų, bet praretinant dujas. Uždarame stikliniame vamzdelyje esančio oro slėgį sumažinus apie tūkstantį kartų, prasideda rusenantis išlydis. Nors elektrinis laukas lieka toks pat, bet retėjant dujoms didėja perkeliamų elektronų laisvasis kelias, o kartu didėja ir įgyjama kinetinė energija. Smūginę jonizaciją bei dėl jos vykstančią rekombinaciją lydi dujų švytėjimas. Rusenančio išlydžio metu uždarame vamzdelyje esančių dujų švytėjimo spalva priklauso nuo dujų rūšies. Rusenantis išlydis plačiai naudojamas iliuminacijoms, reklaminėms šviesoms.

Iki šiol kalbėjome apie tris medžiagos būsenas: kietą, skystą ir dujinę. Tačiau dujų, kuriose gali vykti išlydis, savybės labai skiriasi nuo įprastų dujų savybių. Todėl iš dalies arba visiškai jonizuotos dujos laikomos ketvirtąja medžiagos būsena – **plazma**. Nors plazma sudaryta iš jonų ir elektronų, tačiau ji elektriškai neutrali: teigiamų jonų ir elektronų bei neigiamų jonų koncentracija bet kurioje vietoje yra vienoda. Plazma – tai ne tik dujos išlydžio metu. Paprasčiausias plazmos pavyzdys yra liepsna. 99,9 % Visatos medžiagos yra plazma. Saulė, žvaigždės, tarpžvaigždinės dujos irgi yra plazmos būsenos.

Toliau retinant dujas išlydžio vamzdelyje, tam tikru momentu savaiminis išlydis nutrūksta. Jis nevyksta ir veikiant jonizatoriui. Taip atsitinka tuomet, kai inde esančių dalelių susidūrimo tikimybė ypač sumažėja. Kai inde lieka tiek mažai molekulių, kad jos praktiškai nesusiduria, sakome, kad inde yra **vakuumas** (tuštuma). Tam tikromis sąlygomis elektros srovė gali tekėti ir vakuumu. Tai vyksta elektroniniuose prietaisuose. Paprasčiausias iš jų yra dviejų elektrodų elektroninė lempa – **diodas**. Diode vienas iš elektrodų yra kaitinamas. Dėl to vyksta termoelektroninė emisija, įkaitęs elektrodas išspinduliuoja elektronus. Jei kaitinamas elektrodas elektriškai neutralus, netekęs elektronų jis virsta teigiamu ir todėl dalis elektronų apgaubia jį, o dalis grįžta atgal. Elektrodą gali kaitinti juo tekanti elektros srovė – tiesioginio kaitinimo diode, arba arti esantis kaitinimo

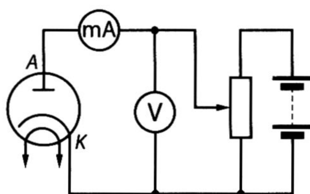




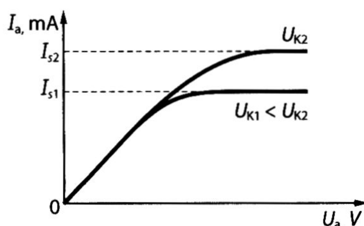
99 pav.

siūlelis – netiesioginio kaitinimo diode. Tiesioginiam kaitinimui naudojama nuolatinė elektros srovė, netiesioginiam – kintamoji. Diodai schemose žymimi taip (žr. 99 pav.).

Diodas pasižymi vienpusiu laidumu: jei įkaitusio elektrodo potencialas yra neigiamas šalto elektrodo atžvilgiu, tai srovė per jį teka, o jei teigiamas – neteka. Potenciometro šliaužiklį (žr. 100 pav.) stumiant į viršų, įtampa tarp anodo (*A*) ir katodo (*K*) didės, o kartu didės per diodą tekančios anodinės srovės stipris. Ši priklausomybė (žr. 101 pav.) vadinama diodo **voltamperine charakteristika.** Kuo didesnė įtampa, tuo daugiau elektronų sukelia srovę ir mažiau jų grįžta į katodą. Kai srovę sudaro visi išspinduliuoti elektronai, pasiekiama soties srovė. Padidinti soties srovę galima tik pakėlus katodo temperatūrą, t. y. padidinus U_k.

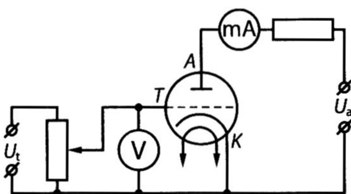


100 pav.



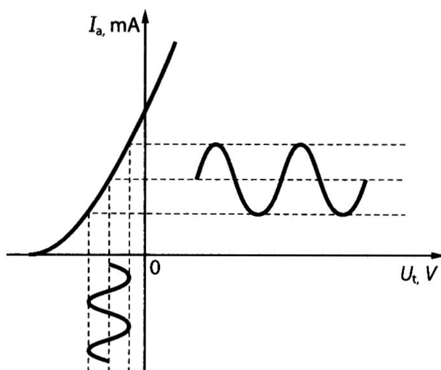
101 pav.

Elektronine lempa tekančios srovės stiprį I_a, nekeičiant anodinės įtampos U_a, galima keisti papildomu elektrodu. Trijų elektrodų elektroninėje lempoje – **triode** (102 pav.) – esantis trečiasis elektrodas vadinamas tinkleliu (T). Jis yra tarp anodo ir katodo. Kadangi tinklelis yra žymiai arčiau katodo negu anodas, nedideli jo potencialo kitimai katodo atžvilgiu stipriai veikia anodinės srovės



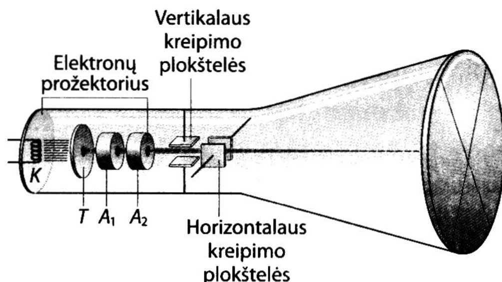
102 pav.

tekėjimą (grafikas $I_a = f(U_t)$ (103 pav.). Todėl triodas plačiai naudojamas įvairių elektrinių signalų kitimui stiprinti. Esant tam tikrai neigiamai tinklelio įtampai katodo atžvilgiu, anodinė srovė gali nutrūkti. Sakoma, kad tinklelis uždarė triodą. Todėl triodas taip plačiai naudojamas elektrinių procesų valdymui grandinėse: čia jis atlieka jungiklio funkciją.



103 pav.

Dar vienas vakuuminis prietaisas yra **elektroninis vamzdis** (104 pav.). Elektroninį vamzdį sudaro storasienis stiklinis indas, iš kurio išsiurbtas oras. Priekinė indo sienelė – ekranas – iš vidaus padengta liuminoforu – medžiaga, kuri spinduliuoja šviesą, kai į ją

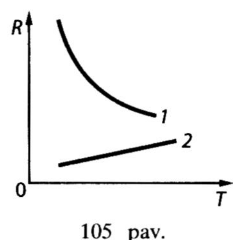


104 pav.

smogia elektronai. Siaurojoje indo dalyje įmontuotas elektronų prožektorius – įrenginys, sukuriantis elektronų spindulį – siaurą elektronų pluoštą. Elektronų prožektorių sudaro kaitinimo siūlelis, katodas, valdantysis elektrodas ir du cilindro formos anodai. Valdantysis elektrodas – tai tarsi tinklelis triode. Keičiant jo potencialą katodo atžvilgiu, galima keisti elektronų kiekį pluoštelyje ir jų skriejimo greitį, o kartu ir liuminoforo taško švytėjimo stiprį. Kadangi anodai yra tuščiavidurių cilindrų formos, didžioji dalis elektronų pralekia per juos ir sudaro elektronų pluoštą – elektroninį spindulį. Keičiant anodų įtampą vienas kito atžvilgiu, kinta jų elektrinio lauko linijų konfigūracija, o kartu ir lauko poveikis pralekiantiems elektronams. Taip galima reguliuoti elektronų pluošto storį ir sukelti

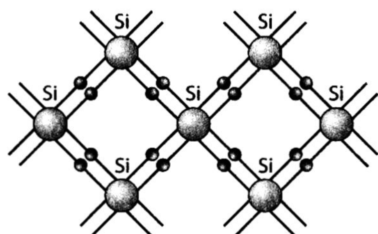
liuminoforo švytėjimą viename taške. Tarp elektronų prožektoriaus ir ekrano yra dvi lygiagrečių plokštelių poros: viena vertikali (elektronus kreipia horizontaliai), kita horizontali (elektronus kreipia vertikaliai). Keisdami įtampą tarp plokštelių, elektronų pluoštą galime nukreipti į bet kurią ekrano vietą. Elektroninis spindulys gali būti valdomas ir magnetiniu lauku, keičiant ant elektroninio vamzdžio užmautose ritėse tekančios srovės stiprį. Elektroniniai vamzdžiai naudojami periodinių elektrinių signalų grafikams stebėti (oscilografo vamzdis) bei vaizdui televizorių ekranuose atkurti (kineskopas).

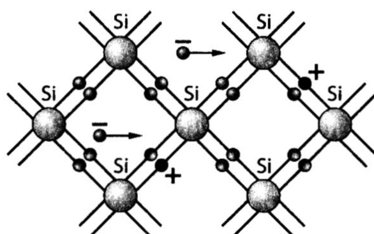
Be vakuuminių prietaisų, elektronikoje plačiai naudojami panašiomis savybėmis pasižymintys puslaidininkiniai prietaisai. Nors elektrinio laidumo požiūriu medžiagos skirstomos į laidininkus ir dielektrikus, pažymėtina, kad egzistuoja medžiagos, kurių savybės nebūdingos nė vienai šių grupių. Lyginant su laidininkais jų varža per didelė, o lyginant su dielektrikais – per maža. Ši medžiagų grupė vadinama **puslaidininkiais**. Požymis, leidžiantis atskirti puslaidininkį nuo laidininko, yra skirtinga varžos priklausomybė nuo temperatūros (105 pav.). Laidininkų varža kylant temperatūrai didėja (*2*), o puslaidininkių – mažėja (*1*). Taip pat puslaidininkių varža priklauso nuo šviesos poveikio bei juose esančių priemaišų. Puslaidininkiniai prietaisai, jautrūs temperatūros kitimui, vadinami termistoriais arba termorezistoriais, o jautrūs šviesos poveikiui – fotorezistoriais.



105 pav.

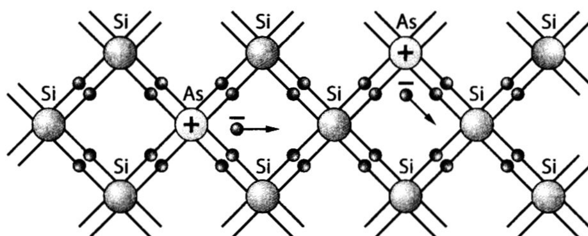
Plačiausiai naudojama puslaidininkinė medžiaga yra silicis (Si). Tai keturvalentė kristalinės struktūros medžiaga. Kiekvienas Si atomas išoriniame sluoksnyje turi po 4 elektronus ir kovalentinėmis jungtimis yra susijungęs su 4 gretimais atomais (106 pav., *a*). Kiekvienos jungties vaidmenį atlieka elektronų pora. Vienas elektronas yra vieno, kitas – kito atomo. Labai žemoje temperatūroje laisvų elektronų beveik nėra, medžiaga veikia kaip izoliatorius. Tačiau kylant temperatūrai (arba dėl šviesos poveikio) didėja elektronų energija – kai kurie iš jų sugeba atitrūkti nuo atomų ir virsti laisvais. Didėjant laisvųjų elektronų koncentracijai medžiagos varža mažėja. Vieta jungtyje, iš kurios išsilaisvino elektronas, vadinama skylute.





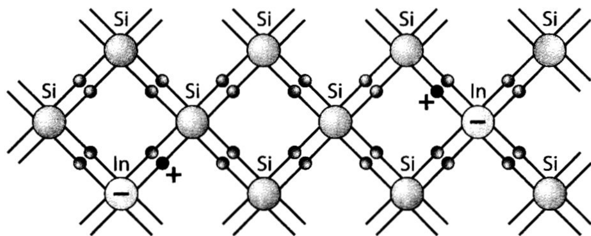
106 pav.

Formaliai į skylutę žiūrima kaip į teigiamai įelektrintą dalelę (106 pav., *b*). Kai nėra puslaidininkį veikiančio išorinio lauko, išsilaisvinę elektronai juda chaotiškai. Taip pat chaotiškai juda ir skylutės, nes iš gretimos jungties išsilaisvinęs elektronas gali pakliūti į jungtį, kurioje jo trūksta. Toks procesas gali kartotis. Nors realiai judančios puslaidininkyje teigiamos dalelės nėra (elektronai peršoka iš vienos jungties į kitą), formaliai patogiau nagrinėti tos vietos, kurioje trūksta elektrono, judėjimą. Todėl sakoma, kad puslaidininkis pasižymi **elektroniniu ir skyliniu laidumu.** Grynųjų puslaidininkių elektroninis ir skylinis laidumai vienodi. Į pagrindinę puslaidininkių medžiagą įmaišius didesnio valentingumo priemaišų (donorų), kristaluose kai kuriuos pagrindinės medžiagos atomus pakeičia priemaišų atomai (107 pav.). Kadangi priemaišų (pvz., As siliciui) atomo išoriniame sluoksnyje elektronų yra daugiau negu pagrindinės medžiagos atomo išoriniame sluoksnyje, pirmiausiai išsilaisvina tie priemaišų jungtims su pagrindinės medžiagos atomais nepanaudoti valentiniai elektronai. Todėl tokiame puslaidininkyje laisvųjų elektronų yra daugiau negu skylučių. Puslaidininkiai su donorinėmis



107 pav.

priemaišomis vadinami *n* (*negativ* (vok.) – neigiamas) tipo, nes juose pagrindiniai krūvininkai yra elektronai, o nepagrindiniai – skylutės. Puslaidininkyje, kuriame yra mažesnio valentingumo priemaišų (akceptorių), pagrindiniai krūvininkai yra skylutės, nepagrindiniai – elektronai. Puslaidininkiai su akceptorinėmis priemaišomis (pvz., In siliciui 108 pav.) vadinami *p* (*positiv* (vok.) – teigiamas) tipo puslaidininkiais.

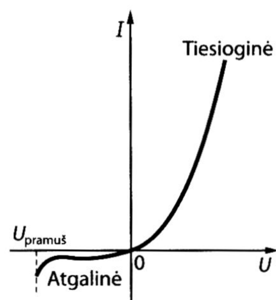


108 pav.

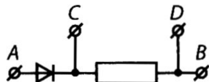


109 pav.

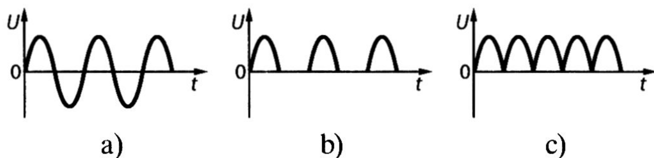
Puslaidininkinių prietaisų veikimas pagrįstas *p* ir *n* tipo puslaidininkių sąlyčio (arba *pn* sandūros (109 pav.) savybėmis. Įjungiant į grandinę *pn* sandūrą, prie *p* tipo puslaidininkio jungiamas teigiamas šaltinio polius, o prie *n* – neigiamas (tiesioginė kryptis), abiejų tipų puslaidininkiuose srovę sudaro pagrindiniai krūvininkai, todėl sandūros varža palyginti maža. Jeigu šaltinio polius prijungsime atvirkščiai – prie *p* neigiamą, o prie *n* teigiamą (atgalinė kryptis), tai srovę sudarys nepagrindiniai krūvininkai, ir sandūros varža bus didelė. Kaip matome, sandūros laidumas priešingomis kryptimis smarkiai skiriasi (110 pav.). Laikydami, kad nelaidžiąja kryptimi varža labai didelė, galime teigti, kad *pn* sandūrai, kaip ir vakuuminiam diodui, būdingas vienpusis laidumas. Puslaidininkinis diodas schemose žymimas —▷|—. Diodai plačiai naudojami kintamajai srovei lyginti. Taškuose *A* ir *B* (111 pav.) įtampos

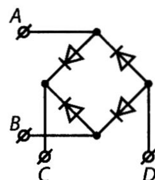


110 pav.



111 pav.



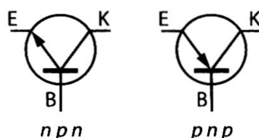


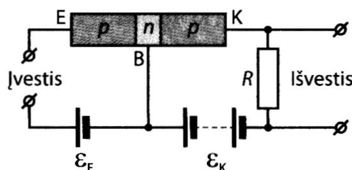
112 pav.

113 pav.

kitimas atitinka grafiką 112 pav., *a*, o įtampos kitimo taškuose *C* ir *D* – grafiką 112 pav., *b*. Norint, kad *C* ir *D* taškuose įtampa būtų abu kitimo pusperiodžius (112 pav., *c*), jungiama keturių diodų grandinė (113 pav.).

Lempiniam triodui savo savybėmis analogiškas puslaidininkinis prietaisas **tranzistorius**. Tranzistorių sudaro dvi *pn* tipo sandūros, t. y. tarp dviejų kokio nors tipo puslaidininkių įterptas kitoks puslaidininkis. Todėl galimi dviejų rūšių tranzistoriai: *pnp* ir *npn*. Tranzistorius schemose žymimas taip (žr. 114 pav.).





114 pav.

115 pav.

Nežiūrint tranzistoriaus tipo, sandūra emiteris-bazė (EB) jungiama laidžiąja kryptimi, o bazė-kolektorius (BK) – užtveriamąja kryptimi (115 pav.). Sudarant skirtingo dydžio įtampas EB ir BK gnybtuose pasiekiama, kad per abi sandūras tekančių srovių stipriai būtų vienodi. Tada su baze B sujungtu laidu tekančios srovės stipris lygus nuliui. Padidėjusi gnybtų EB įtampa sukelia srovės stiprio padidėjimą ne tik kairėje *pn* sandūroje (bazėje), bet ir dešinėje (kolektoriuje). Be to, didžioji sustiprėjusios srovės dalis tekės kolektoriumi, o ne baze. $\frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{a}{b}$; čia *a* – bazės plotis, *b* – bazės storis. Nedaug pakeitus EB įtampą, galima gauti analogiškus, tačiau stipresnius įtampos kitimus rezistoriaus *R* gnybtuose. Kai $U_{\text{įvesties}}$ didesnė už $\mathcal{E}_E$, tik priešingo ženklo, srovė kolektoriaus grandinėje nutrūks.

3. Magnetinis laukas

Be visuotinės traukos, būdingos visiems kūnams, ir elektrinės sąveikos, kuria sąveikauja tik tam tikra savybe pasižymintys (įelektrinti) kūnai, egzistuoja dar viena sąveika – magnetinė. Ši sąveika būdinga laidams, kai jais teka elektros srovė, magnetams, judančioms įelektrintoms dalelėms, Žemei ir kai kuriems kitiems dangaus kūnams. Ir elektrinė, ir magnetinė sąveika vyksta per tarpinę grandį – elektrinį ir magnetinį laukus. **Magnetinis laukas** – tai materija su jai būdingomis savybėmis. Magnetinis laukas nėra medžiaga, neturi jos savybių kaip ir elektrinis laukas. Tačiau kitais požymiais jie skiriasi vienas nuo kito. Elektrinį lauką turi kiekvienas įelektrintas kūnas, magnetinį – judantis įelektrintas kūnas, laidas, kuriuo kryptingai juda įelektrintos dalelės (teka srovė), nuolatiniai magnetai. Elektrinis laukas veikia įelektrintus kūnus, daleles, o magnetinis – laidus, magnetus, kryptingai judančias įelektrintas daleles.

Iš laidininko pagamintą rėmelį su juo tekančia elektros srove arba magnetą (kompaso rodyklę) magnetinis laukas, kuriame jie atsiduria, pasuka (orientuoja) į tam tikrą padėtį. Kadangi Žemės magnetinis laukas kompaso rodyklę (magnetą) orientuoja vienu galu į šiaurę, kitu – į pietus, magneto galai vadinami šiauriniu (*N*) ir pietiniu (*S*) poliais*. Magnetinio lauko sukamąjį veikimą apibūdiname jėgų momentu *M*. Magnetinis laukas stipriausiai suka rėmelį, kuriuo teka srovė, šiam esant statmenai tai padėčiai, į kurią jį orientuoja magnetinis laukas. Maksimalaus jėgų momento M_{max} santykis su rėmeliu tekančios srovės stipriu *I* bei rėmelio plotu *S* priklauso tik nuo rėmelį sukančio magnetinio lauko. Todėl šį santykį laikome dydžiu, apibūdinančiu magnetinį lauką – **magnetine indukcija**: $B = \frac{M_{max}}{IS}$. Magnetinė indukcija SI vienetų sistemoje matuojama teslomis (T): $1\,\mathrm{T} = 1\frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{A \cdot m^2}} = 1\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A \cdot m}}$.

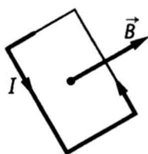
Magnetinė indukcija yra vektorinis dydis. $\vec{B}$ kryptimi laikome magnetinio lauko orientuotos magnetinės rodyklės šiaurinio poliaus rodomą kryptį (116 pav.).

---

* Polių žymėjimo simboliai: *N* – iš anglų k. *North* „šiaurė“, *S* – iš anglų k. *South* „pietūs“.



116 pav.



117 pav.

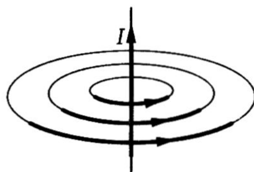


118 pav.

Taip pat $\vec{B}$ kryptis sutampa su statmens, orientuoto į rėmelio plokštumą kryptimi (117 pav.), kurią žymi atlenktas į šoną dešinės rankos nykštys, kai keturi pirštai rodo srovės tekėjimo kryptį rėmeliu (**dešiniosios rankos taisyklė**).

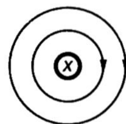
Siekiant aiškumo, magnetinis laukas vaizduojamas linijomis. Jų tankis proporcingas indukcijai, o linijos liestinės kryptis sutampa su $\vec{B}$ kryptimi (118 pav.). $B = \frac{M_{max}}{IS}$ yra magnetinės indukcijos apibrėžimo formulė, ji neparodo, nuo ko priklauso $\vec{B}$. Laidininko, kuriuo teka elektros srovė, magnetinis laukas priklauso nuo jos stiprio, laidininko formos, matmenų, užpildančios erdvę terpės savybių ir atstumo nuo laidininko iki to erdvės taško, kuriame nagrinėjamas magnetinis laukas.

Tiesaus laidininko magnetinio lauko linijos yra koncentriniai apskritimai laidininkui statmenoje (119 pav.) plokštumoje. Jų kryptis taip pat nusakoma **dešiniosios rankos taisykle:** jei nykštys sutampa su srovės tekėjimo kryptimi, tai apkabinantys laidininką keturi pirštai rodo magnetinio lauko linijų kryptį.



119 pav.

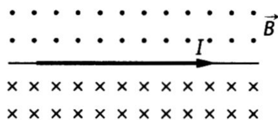
Kai lape nevaizduojamas erdvinis piešinys, bet reikia parodyti tris tarpusavyje statmenas kryptis, dvi iš jų pavaizduojamos rodyklėmis, o trečioji, statmena lapui, jei nukreipta nuo mūsų, žymima × (kryželiu), jei į mus – • (tašku).



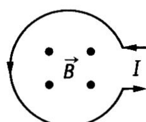
120 pav.

Kai laidas, kuriuo teka elektros srovė, yra statmenas lapo plokštumai, jo magnetinis laukas vaizduojamas taip (120 pav.).

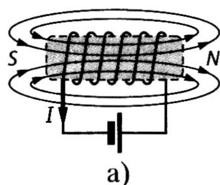
Jei laidininkas yra lapo plokštumoje, magnetinis laukas vaizduojamas šitaip (121 pav.).



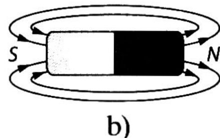
121 pav.



122 pav.



a)



b)

123 pav.

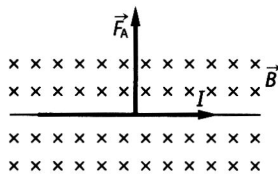
Kai laidininkas yra žiedo formos (122 pav.), magnetinio lauko kryptis jo viduje nustatoma taip pat dešiniosios rankos taisykle, tik ji taikoma atvirkščiai negu tiesiam laidininkui: keturi pirštai rodo srovės tekėjimo kryptį, o nykštys – magnetinio lauko kryptį.

Taip pat nustatoma magnetinio lauko kryptis ritės (solenoido) viduje (123 pav., *a*). Ritės viduje magnetinis laukas yra vienalytis, o tolstant nuo jos galų silpnėja. Ritės magnetinio lauko linijų formai analogiška nuolatinio magneto magnetinio lauko linijų forma (123 pav., *b*). Todėl magnetinis polius ritės gale, iš kurio išeina magnetinio lauko linijos, yra šiaurinis, o į kurį sueina – pietinis (123 pav., *a*). Į ritės vidų įstatyta geležinė šerdis magnetinį lauką žymiai sustiprina. Ritė su šerdimi vadinama **elektromagnetu** ir plačiai naudojama įvairiuose prietaisuose. Šerdis pakeičia ritės magnetinį lauką dėl to, kad veikiama buvusio lauko įsimagnetina. Magnetiniame lauke įsimagnetina įvairios medžiagos. Daugelio medžiagų įsimagnetinimas yra silpnas ir išnyksta, išnykus įmagnetinančiam laukui. Tačiau geležis, kobaltas, nikelis ir kai kurie kiti lydiniai įsimagnetina labai stipriai, taigi lieka įmagnetinti net išnykus išoriniam laukui. Ši medžiagų grupė vadinama **feromagnetikais**. Iš jų gaminami nuolatiniai magnetai. Medžiagų magnetinės savybės apibūdinamos magnetine skvarba μ, kuri nusakoma magnetinės indukcijos vienalytėje terpėje $\vec{B}$ ir įmagnetinančio vakuume lauko indukcijos $\vec{B}_0$ modulių santykiu: $\mu = \frac{B}{B_0}$. Feromagnetikų $\mu >> 1$. Likusių medžiagų $\mu \approx 1$. Medžiagų įsimagnetinimą galima paaiškinti remiantis jų sandara. Kadangi medžiagos atomų elektronai juda (skrieja aplink branduolį, be to, tarsi sukasi aplink save), jie turi savo magnetinius laukus. Feromagnetikuose yra mikroskopinės sritys (domenai), kuriose elektronų „savojo sukimosi“ magnetiniai laukai orientuoti viena kryptimi. Kai domenų magnetiniai laukai vienas kito atžvilgiu orientuoti atsitiktinai, medžiaga neturi magnetinio lauko. Išorinis magnetinis laukas priverčia domenus pasisukti (orientuoja pagal išorinio lauko

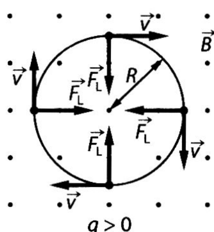
kryptį), ir medžiaga įsimagnetina. Dėl domenų tarpusavio trinties jų orientacija dalinai išlieka ir panaikinus išorinį lauką, todėl kūnas lieka įmagnetintas. Tačiau kylant temperatūrai didėja šiluminis judėjimas, todėl pasiekęs tam tikrą Kiuri temperatūrą feromagnetikas praranda jam būdingas savybes: išnyksta domenai ir elektronai nesugeba išlaikyti vienas kito orientuotų tam tikrose padėtyse.

Dar nėra visiškai išaiškinta, kodėl Žemė turi magnetinį lauką. Buvo manyta, kad jį sukuria Žemės gelmėse esančios geležingos uolienos. Ši prielaida nepasitvirtino, nes dėl aukštos temperatūros Žemės gelmėse magnetinės uolienų savybės išnyksta, o paviršinio sluoksnio uolienų poveikis gana nedidelis. Dabar manoma, kad Žemės magnetinį lauką sukuria jos skystame branduolyje cirkuliuojantys konvekciniai elektringų dalelių srautai. Žemė savo magnetiniu lauku primena milžinišką magnetą, kurio polių padėtis beveik sutampa su geografiniais ašigaliais. Įsidėmėkite, kad magnetinių polių ir geografinių ašigalių vardai yra priešingi. Netoli geografinio šiaurės ašigalio yra pietinis magnetinis polius, o netoli pietinio ašigalio – šiaurinis. Žemės magnetinis laukas nepaprastai reikšmingas. Jis sulaiko iš kosmoso sklindančias elektringąsias daleles, kurių poveikis pražūtingas Žemėje esančiai gyvybei (pakeičia jų skriejimo kryptį).

Magnetinis laukas orientuoja laidų rėmelį, veikdamas tam tikras jo dalis. Jėga, kuria magnetinis laukas veikia jame esančio srovės laidininko (pvz., tiesaus laido) atkarpą, vadinama **Ampero jėga**. Ji priklauso nuo paties magnetinio lauko, laidininko ilgio, juo tekančios srovės stiprio ir laidininko padėties (orientacijos) magnetiniame lauke: $F_A = BIl \sin\alpha$; čia α – kampas tarp magnetinio lauko linijų ir srovės tekėjimo laidininku krypčių. Jėgos kryptis (124 pav.) nusakoma **kairiosios rankos taisykle**: kai delną laikome taip, kad laidininkui statmena magnetinės indukcijos dedamoji būtų statmena delnui, o keturi ištiesti pirštai rodytų srovės tekėjimo kryptį, tai 90° kampu į šoną atlenktas nykštys rodys veikimo kryptį. Iš tiesų magnetinis laukas veikia ne laidininką, kuriuo teka srovė, bet jame judančias elektringąsias daleles. Šis veikimas apibūdinamas **Lorenco jėga**. $F_L = qvB \sin\alpha$; čia q – dalelės krūvis, v – jos judėjimo greitis, α – kampas tarp $\vec{B}$ ir $\vec{v}$



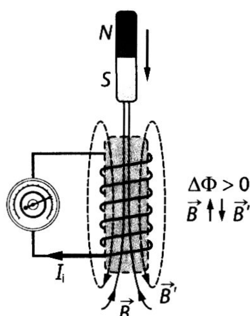
124 pav.



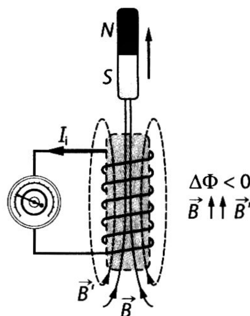
125 pav.

krypčių, kai dalelė teigiama, bei tarp $\vec{B}$ ir priešingos $\vec{v}$ krypčiai krypties, kai dalelė neigiama. Lorenco jėgos kryptis (125 pav.) nustatoma taip pat kairiosios rankos taisykle. Šiuo atveju keturi pirštai rodo $\vec{v}$ kryptį, kai $q > 0$, ir priešingą $\vec{v}$, kai $q < 0$.

Elektromagnetinė indukcija. Kai į ritės, sujungtos su galvanometru, vidų įstatome arba ištraukiame magnetą, ritėje atsiranda elektros srovė. Tą patį galime gauti įstatydami (ištraukdami) plonesnę ritę (elektromagnetą), kai ja teka srovė, arba keisdami įstatytoje ritėje tekančios srovės stiprį. Visais šiais atvejais vyksta elektromagnetinė indukcija. Jos metu kintantis magnetinis laukas uždarame laidininke (kontūre), kurio ribojamą plotą jis kerta, sukuria elektros srovę. Indukuotoji srovė savo magnetiniu lauku stengiasi priešintis ją sukuriančio lauko kitimui. Tai **Lenco taisyklė**. Taikant Lenco taisyklę kontūre indukuotos srovės I_i krypčiai rasti (126 pav., 127 pav.), reikia:



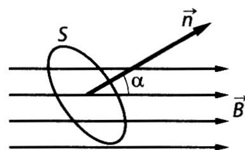
126 pav.



127 pav.

1. Nustatyti išorinio magnetinio lauko indukcijos $\vec{B}$ linijų kryptį.
2. Išsiaiškinti kontūro plotą kertančio lauko magnetinio srauto kitimą: ar jis stiprėja ($\Delta B > 0$), ar silpnėja ($\Delta B < 0$).
3. Nustatyti indukuotosios srovės I_i magnetinio lauko indukcijos $\vec{B}'$ linijų kryptį. Pagal Lenco taisyklę, šių linijų kryptis priešinga $\vec{B}$ linijų krypčiai, kai $\Delta B > 0$, ir sutampa su jų kryptimi, kai $\Delta B < 0$.
4. Žinant $\vec{B}'$ linijų kryptį, pagal dešiniosios rankos taisyklę nustatyti I_i kryptį.

Laidininko ribojamą plotą veriantis magnetinis laukas (128 pav.) apibūdinamas **magnetinio lauko srautu** Φ, kuris matuojamas vėberiais (Wb). Šiuo dydžiu laikome magnetinės indukcijos B, magnetinio lauko veriamo paviršiaus ploto S ir kampo tarp $\vec{B}$ ir statmens paviršiaus plotui (normalės) $\vec{n}$ kosinuso sandaugą: $\Phi = BS\cos\alpha$.



128 pav.

Vienalyčio 1 T indukcijos magnetinio lauko, statmenai kertančio 1 m^2 paviršiaus plotą, srautas lygus 1 Wb. Kadangi kintantis magnetinis laukas sukuria uždarame laidininke elektros srovę, jis gali būti laikomas elektros srovės šaltiniu ir apibūdinamas elektrovara. Jei laidininkas nėra uždaras (ritė atvirais galais arba perpjautas žiedas), šaltinio poliais tampa ritės (žiedo) galai. Kai indukuotoji srovė teka uždaru žiedu, negalima nurodyti, kur yra šaltinio poliai, nes visas žiedas su jį veriančiu magnetiniu lauku yra ir šaltinis, ir grandinė, kurioje šis sukelia elektros srovę. Laidininką ir jo ribojamą plotą veriančio magnetinio lauko elektrovara lygi srauto kitimo greičiui. $\mathcal{E} = -\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'_t$ – tai **elektromagnetinės indukcijos dėsnis**. Kadangi elektrovarą laikome teigiama, kai indukuotosios srovės magnetinis laukas yra tos pačios krypties, kaip ir ją sukuriantis, dėsnyje turi būti minuso ženklas. Kai $\Delta\Phi > 0$, iš Lenco taisyklės aišku, kad sukurtas ir sukuriantis laukai bus priešingų krypčių, vadinasi, $\mathcal{E} < 0$. Kai $\Delta\Phi < 0$ (sukurtas ir sukuriantis laukai vienodų krypčių), tai $\mathcal{E} > 0$.

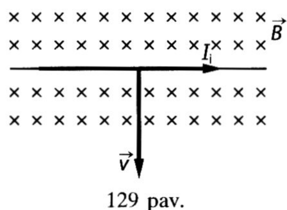
Iš formulės $\Phi = BS \cdot \cos\alpha$ matome, kad magnetinio lauko srautą galima keisti trejopai:

1) keičiant patį magnetinį lauką (artinant ar tolinant magnetą);

2) keičiant pastoviame magnetiniame lauke esančio kontūro ribojamą plotą (□ → ○);

3) keičiant kontūro orientaciją magnetiniame lauke (pasukant kontūrą apie ašį, statmeną magnetiniam laukui).

Turinčioje N vijų ritėje elektromagnetinės indukcijos metu kiekviena vija virsta šaltiniu. Kadangi vijos sujungtos nuosekliai, tai bendra ritės elektrovara $\mathcal{E} = -N\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.



129 pav.

Elektros srovės šaltiniu laikomas ir nekintantis magnetinis laukas bei jame judantis tiesus laidininkas. Šio šaltinio $\mathcal{E} = Blv \sin \alpha$; čia l – laido ilgis, v – jo judėjimo greitis, α – kampas tarp $\vec{B}$ ir $\vec{v}$ krypčių. Magnetiniu lauku judančiame laidininke indukuotosios srovės krypčiai (129 pav.) rasti galima taikyti **dešiniosios rankos taisyklę**: jei ištiesime dešiniąją ranką išilgai laidininko taip, kad magnetinės indukcijos linijos (statmena laidininkui dedamoji) eitų į delną, o atlenktas nykštys rodytų laidininko judėjimo kryptį, tai keturi ištiesti pirštai rodys indukuotosios srovės tame laidininke kryptį.

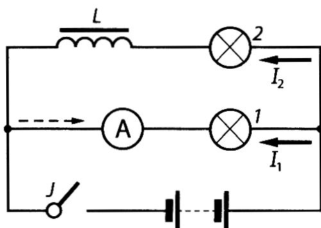
Nors abiem atvejais elektrovaros atsiradimo priežastis yra magnetinis laukas, tačiau esminės priežastys skirtingos. Pirmuoju atveju magnetinis laukas, kisdamas erdvėje, sukuria sūkurinį elektrinį lauką, o žiedas (ritė) tėra tik priemonė tam laukui aptikti. Antruoju atveju, laidininkui judant magnetiniame lauke, šis veikia kartu judančias įelektrintas daleles ir kaip pašalinė jėga įelektrina laido galus (šaltinio polius) bei palaiko jų įelektrinimą.

Kai rite tekančios srovės stipris keičiasi, kartu kinta ir ritės magnetinis laukas, kuris sukelia elektromagnetinės indukcijos reiškinį. Toks reiškinys vadinamas **saviindukcija**. Saviindukcijos metu laidininkas priešinasi jame tekančios srovės kitimui. Ši laidininko savybė nusakoma fizikiniu dydžiu – **induktyvumu** L, matuojamu henriais (H). Induktyvumas priklauso nuo laidininko matmenų, formos bei laidininko aplinkos magnetinių savybių ir nepriklauso nuo laidininku tekančios srovės stiprio. Pavyzdžiui, ritės induktyvumas daug didesnis už to paties tiesaus laidininko induktyvumą. Į ritės vidų įstatyta feromagnetiko šerdis šimtus ar net tūkstančius kartų padidina induktyvumą. Taip pat induktyvumas rodo ritę veriančio savojo magnetinio srauto ir ja tekančios srovės stiprio sąryšį: $\Phi = LI$. Todėl saviindukcijos elektrovara tiesiogiai proporcinga elektros srovės kitimo greičiui:

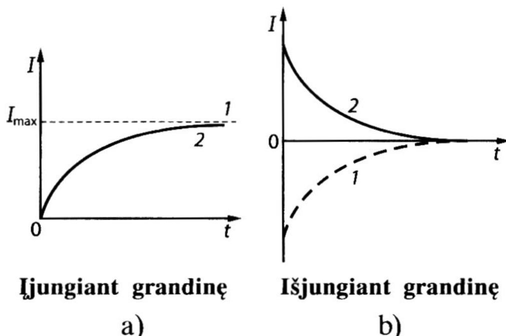
$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} = -LI'_t.$$

Šiuo sąryšiu apibrėžiamas induktyvumo vienetas henris. Vienas henris – tai induktyvumas tokio laidininko (ritės), kuriame indukuojama 1 volto elektrovara, kai elektros srovės stipris kas sekundę pakinta 1 amperu: $1\,\mathrm{H}=\dfrac{1\,\mathrm{V}\cdot 1\,\mathrm{s}}{1\,\mathrm{A}}$.

Saviindukcijos reiškinį galima stebėti pagal pateiktą schemą sujungtoje grandinėje (130 pav.). Grandinės įjungimo metu (131 pav., *a*) *1* lemputė įsižiebs staiga, o *2* – palaipsniui, nes ideali ritė ($R = 0$) priešinsis tekančios srovės augimui. Išjungus grandinę (131 pav., *b*), lemputės dar kurį laiką švies, tačiau įjungtas ampermetras rodys, kad per 1 lemputę tekančios srovės kryptis pakito į priešingą. Jungiklį išjungus dėl saviindukcijos, srovės šaltiniu tampa ritė su išnykstančiu savo magnetiniu lauku.



130 pav.



a) b)

131 pav.

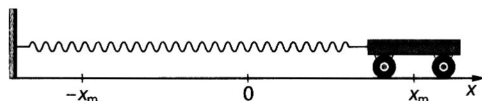
Saviindukcija savo dėsningumais analogiška inercijai. Inercijos metu kūnas priešinasi judėjimo greičio kitimui, saviindukcijos metu – srovės stiprio kitimui. Kūno inertiškumas nusakomas mase, analogiška laidininko savybė – induktyvumu. Judantis kūnas apibūdinamas darbu, kurį jis gali atlikti dėl to, kad juda, t.y. kinetine energija; analogiškai laidininkas, kuriuo teka elektros srovė, apibūdinamas energija $W_{magn} = \dfrac{LI^2}{2}$. Ši energija – tai ne tik laidininko, kuriuo teka elektros srovė, bet ir jo magnetinio lauko energija.

IV.

1. Mechaniniai svyravimai ir elektromagnetiniai virpesiai

Vienas netolygiai (bet dėsningai) kintamo judėjimo pavyzdžių yra svyravimas. Kadangi jo metu kūnas tiksliai arba apytiksliai po tam tikro laiko pakartoja judesį, svyravimas, kaip ir materialiojo taško tolyginis judėjimas apskritimu, apibūdinamas **periodu** T [s]. Periodas yra laikas, per kurį kūnas susvyruoja vieną kartą: $T = \frac{t}{N}$. Taip pat svyravimams apibūdinti naudojamas periodui atvirkščias dydis – **dažnis**: $f = \frac{1}{T}$. Dažnis pasako svyravimų skaičių per laiko vienetą, todėl $f = \frac{N}{t}$. Dažnio matavimo vienetas yra hercas (Hz). Kūno, kuris per 1 s susvyruoja vieną kartą, svyravimo dažnis lygus 1 Hz $\left(1\,\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}} = 1\,\text{s}^{-1}\right)$. Be šio dažnio, svyravimas apibūdinamas **kampiniu dažniu** ω. Kampinis dažnis parodo, kiek kartų kūnas susvyruoja per 2π sekundžių (~ 6,28 ... s): $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$. Kampinis dažnis matuojamas radianais per sekundę $\left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$.

Svyravimai yra skirstomi į laisvuosius ir priverstinius. Laisvaisiais vadiname tuos, kurie vyksta uždaroje kūnų sistemoje dėl kūnų tarpusavio sąveikos. Jie gali vykti tik pastovios pusiausvyros sistemoje. Kalbėdami apie laisvuosius svyravimus, tradiciškai nagrinėjame dvi svyruokles: 1) spyruoklės veikiamą kūną (132 pav.); 2) matematinę svyruoklę (133 pav.).

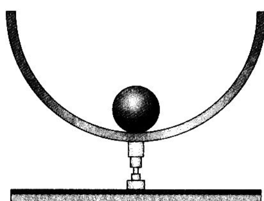


132 pav.

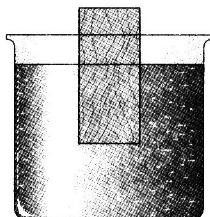


133 pav.

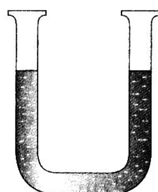
Pirmąją sistemą sudaro spyruoklė ir kūnas, antrąją – ant netampraus absoliučiai lankstaus siūlo pakabintas materialiuoju tašku laikomas kūnas ir Žemė. Tačiau tokių svyravimo sistemų gali būti ir daugiau. Pavyzdžiui: dauboje esantis rutuliukas ir Žemė (134 pav., *a*), skystyje plūduriuojantis kūnas ir Žemė (134 pav., *b*), susisiekiančiuose induose esantis skystis ir Žemė (134 pav., *c*). Visos šios išorinio poveikio išvestos iš pusiausvyros būsenos ir paleistos sistemos atliks laisvuosius svyravimus. Svyravimų periodą (dažnį) lemia sistemos savybės. Spyruoklės veikiamo kūno svyravimo periodas priklauso nuo spyruoklės standumo ir kūno inertiškumo: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.



a)



b)

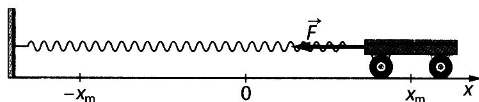


c)

134 pav.

Matematinės svyruoklės periodą lemia siūlo ilgis ir Žemės veikimo sukeliamas pagreitis: $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Pagal sąlygas laisvieji svyravimai skirstomi į idealius (neslopinamuosius) ir realius (slopinamuosius). Idealūs (neslopinamieji) svyravimai vadinami harmoniniais. Jų metu svyruojančio kūno koordinatė, greitis ir pagreitis laiko atžvilgiu kinta pagal sinuso ar kosinuso dėsnius. Svyravimui būdingus dėsningumus žodžiais atskleisti gana sudėtinga. Pabandykime tai atlikti, nagrinėdami spyruoklės veikiamo kūno svyravimą. Išorinio poveikio išvesta iš pastoviosios pusiausvyros būsenos sistema po paleidimo tarpusavio sąveikos dėka greitėjančiai grįžta į ją (135 pav.). Spyruoklės veikiamas vežimėlis greitėdamas juda į pusiausvyros padėtį. Kadangi spyruoklės deformacija mažėja, greitėjimas

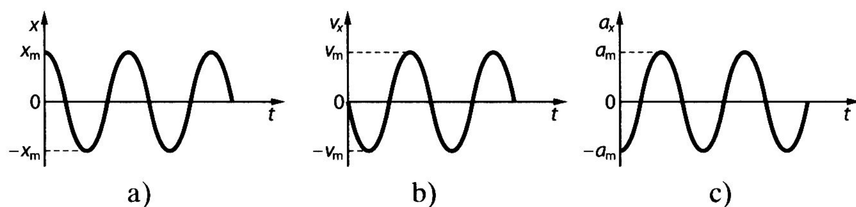


135 pav.

(pagreitis) taip pat mažėja. Pusiausvyros padėtį praėjęs kūnas judėdamas iš inercijos deformuoja spyruoklę, kuri jį stabdo ir sustabdžiusi priverčia grįžti atgal. Matome, kad svyravimo metu greitis ir pagreitis tai didėja, tai mažėja. Žymiai paprasčiau svyravimo dėsningumus užrašyti funkcijomis. Jei laiką matuojame nuo paleidimo iš kraštinės teigiamos padėties akimirkos, tai svyravimas vyksta pagal šiuos kitimo dėsnius: kūno koordinatės – $x = x_m \cos \omega t$; greičio – $v_x = x'_t = -x_m \omega \sin \omega t = -v_m \sin \omega t$; pagreičio – $a_x = v'_t = -v_m \omega \cos \omega t = -a_m \cos \omega t$. Šiuose dėsniuose kosinuso ar sinuso funkcijų argumentas vadinamas **svyravimo faze**. Svyravimo fazė – tai dar vienas svyravimą apibūdinantis dydis, kuris parodo svyruojančio kūno padėtį bet kuriuo laiko momentu: $\varphi = \omega t = 2\pi f t = \frac{2\pi}{T} t$. Fazė matuojama radianais (rad). Iš praėjusios fazės galima spręsti, kokia svyravimo dalis praėjo. Naudojantis jos duomenimis, patogu lyginti, kiek vienas svyravimas lenkia kitą svyravimą (arba atsilieka nuo jo). x_m, v_m, a_m – svyruojančio kūno judėjimą apibūdinančių periodiškai kintamų dydžių įgyjamos didžiausios reikšmės. Jos vadinamos **amplitudėmis**. $v_m = x_m \omega = \frac{2\pi}{T} x_m$, $a_m = v_m \omega = x_m \omega^2$ – šios formulės rodo svyruojančio kūno koordinatės, greičio ir pagreičio amplitudžių sąryšį. Atkreipkite dėmesį, kad šiose sąryšio formulėse π yra tik skaičius, lygus apskritimo ilgio ir skersmens santykiui (~3,14 ...), o kosinuso ar sinuso funkcijų argumentuose π yra per pusę svyravimo periodo praeinanti fazė, matuojama radianais (~3,14 rad).

Svyravimui būdingus dėsningumus galima pavaizduoti grafiškai (žr. 136 pav., *a, b, c*).

Argumentas šių dydžių kitimuose gali būti laikas, atidėtas laiko vienetais arba periodais (jo dalimis). Taip pat argumentas gali būti praėjusi



136 pav.

svyravimo fazė. Iš grafikų matyti, kad šių dydžių kitimai savo fazėmis nesutampa. Pavyzdžiui, greičio kitimas faze $\frac{\pi}{2}$ rad lenkia koordinatės kitimą, bet tokia pat faze atsilieka nuo pagreičio kitimo. Pradiniu stebėjimo momentu svyruojantis kūnas gali būti bet kurioje padėtyje tarp $-x_m$ ir x_m, todėl kūno koordinatės kitimo lygtis užrašoma pagal sinuso ar kosinuso dėsnius, panaudojant pradinę fazę. Bendruoju atveju $x = x_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$. Čia φ_0 – pradinė fazė, galinti turėti reikšmes nuo 0 iki 2π rad. Jeigu to paties svyravimo koordinatės kitimo dėsnis būtų užrašomas per sinuso funkciją, tai pradinė fazė $\frac{\pi}{2}$ rad reikšme sumažėtų. Žinodami svyruojančio kūno pradinę koordinatę ir jos amplitudę bei pasirinktą jos kitimo funkciją (*sin* ar *cos*), apskaičiuojame pradinę fazę. Jei $\varphi_0 \geq \frac{\pi}{2}$ rad, pasirinktą funkciją galima redukuoti taip, kad pradinė fazė būtų intervale nuo $-\frac{\pi}{2}$ rad iki $\frac{\pi}{2}$ rad. Svyruojančio kūno greičio ir pagreičio kitimo dėsnius galime gauti surasdami pirmąją ir antrąją koordinatės išvestinę laiko atžvilgiu.

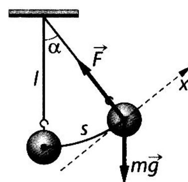
Analogiški yra matematinės svyruoklės (137 pav.) svyravimo dėsniai. Jei svyruoklės nuokrypio kampas α yra mažas ($s << l$), tai

$$s = s_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right); \quad v_x = -v_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right); \quad a_x = -a_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right);$$

čia $v_m = s_m \frac{2\pi}{T}$ ir $a_m = v_m \frac{2\pi}{T} = s_m \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$. Šiuose svyravimo dėsniuose s – kūno nuokrypio lanko ilgis, galintis turėti tiek teigiamas, tiek neigiamas reikšmes.

Idealiuosius svyravimus atliekančiai sistemai galioja mechaninės energijos tvermės dėsnis: pilnutinė svyravimo sistemos mechaninė energija lygi darbui, kuris atliekamas išvedant sistemą iš pusiausvyros padėties. Ši energija lieka pastovi, tik periodiškai kinta jos rūšys:

$$E_p + E_k = E_{p\,max} = E_{k\,max} = E_{piln} = const = A.$$



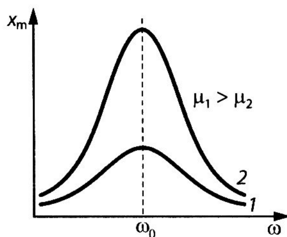
137 pav.

Idealus svyravimas yra amžinas, jo metu amplitudė nekinta.

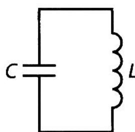
Realiai judantys kūnai sąveikauja trinties, pasipriešinimo judėjimui skysčiuose ir dujose jėgomis, o sukeliamos deformacijos nėra absoliučiai tamprios. Todėl realiai svyravimų sistemai galioja tik pilnutinės energijos tvermės dėsnis, įskaitant ir vidinę energiją. Atskirai negalioja nei mechaninės, nei vidinės energijos tvermės dėsniai. Realių svyravimų metu sistemos mechaninė energija mažėja, o vidinė – didėja, todėl realūs laisvieji svyravimai yra slopinamieji. Kai visa sistemai „suteikta“ mechaninė energija virsta vidine, svyravimas nebevyksta.

Be laisvųjų svyravimų, galimi ir priverstiniai. Juos sukelia išorinis periodiškai kintantis veikimas $F_x = F_m \cos\omega t$. Priverstinių svyravimų dažnis lygus išorinės jėgos kitimo dažniui. Priverstinai svyruoti gali bet kokie kūnai. Kai laisvai svyruoti galinčioje sistemoje sukeliami priverstiniai svyravimai, kurių dažnis sutampa su galimų laisvųjų svyravimų dažniu, vyksta **rezonanso reiškinys**. Jei sąlygos idealios, rezonanso metu svyravimų amplitudė didėja (teoriškai be galo), kol sistema sulūžta, nes išorinės jėgos darbas visą laiką teigiamas, dėl to didinama sistemos pilnutinė mechaninė energija, o drauge ir amplitudė. Realaus svyravimo metu amplitudė didėja tik iš pradžių, nes kartu su ja didėja ir pasipriešinimo jėgų darbas. Kai per periodą išorinės jėgos atliktas darbas susilygina su pasipriešinimo jėgų darbu, priverstinio svyravimo amplitudė tampa pastovi. Kuo didesnis pasipriešinimo judėjimui koeficientas, tuo rezonansas mažiau ryškus (138 pav.). Rezonanso reiškinys turi praktinį pritaikymą, tačiau kartais jis padaro daug žalos. Dėl rezonanso sugriūva pastatai, tiltai, lūžta įvairūs įrenginiai.

Elektrodinamikoje egzistuoja mechaniniams svyravimams analogiški reiškiniai – **elektriniai virpesiai**. Jie būdingi elektros grandinėms. Laidininkų savybės nusakomos trimis dydžiais: varža R, induktyvumu L ir talpa C. Laisvieji elektriniai virpesiai vyksta grandinėje, sudarytoje iš kondensatoriaus ir ritės (139 pav.). Ši grandinė vadinama **virpesių kontūru**. Virpesiai sukeliami įkrautą kondensatorių prijungus prie ritės.



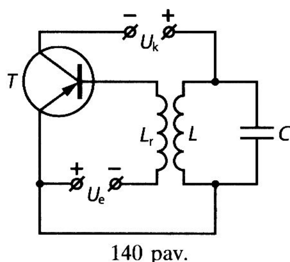
138 pav.



139 pav.

Kadangi mechaniniai svyravimai ir elektriniai virpesiai savo dėsningumais analogiški, pateikiame dydžių ir dėsningumų analogiją.

Mechaninių svyravimų ir elektrinių virpesių analogija	
Mechaniniai dydžiai	Elektriniai dydžiai
x – koordinatė apibūdina išvedimą iš pusiausvyros būsenos	q – krūvis apibūdina išvedimą iš pusiausvyros būsenos
$v_x = x'_t$ – greitis	$i = q'_t$ – srovės stipris
$a_x = v'_t = x''_t$ – pagreitis	$i'_t = q''_t$ – srovės stiprio kitimo greitis
m – masė	L – induktyvumas
k – tamprumo koeficientas	$\frac{1}{C}$ – atvirkščias talpai dydis
$E_\mathrm{p} = \frac{kx^2}{2}$ – spyruoklės potencinė energija	$E_\mathrm{p} = \frac{q^2}{2C}$ – kondensatoriaus (elektrinė) energija
$E_\mathrm{k} = \frac{mv^2}{2}$ – kūno kinetinė energija	$E_\mathrm{m} = \frac{Li^2}{2}$ – ritės (magnetinė) energija
Slopina trintis, pasipriešinimas judėjimui	Slopina R – varža
Svyravimų periodas $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	Virpesių periodas $T = 2\pi\sqrt{LC}$ – (Tomsono formulė)
Dėsniai: $x = x_\mathrm{m} \cos\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t$ $v_x = -v_\mathrm{m} \sin\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t$ $a_x = -a_\mathrm{m} \cos\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t$ Ryšys tarp amplitudžių: $v_\mathrm{m} = x_\mathrm{m}\sqrt{\frac{k}{m}}$ $a_\mathrm{m} = v_\mathrm{m}\sqrt{\frac{k}{m}} = x_\mathrm{m}\frac{k}{m}$	Dėsniai: $q = q_\mathrm{m} \cos\frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot t$ $i = -i_\mathrm{m} \sin\frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot t$ $i'_t = -i'_{t\mathrm{m}} \cos\frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot t$ Ryšys tarp amplitudžių: $i_\mathrm{m} = q_\mathrm{m}\frac{1}{\sqrt{LC}}$ $i'_{t\mathrm{m}} = i_\mathrm{m}\frac{1}{\sqrt{LC}} = q_\mathrm{m}\frac{1}{LC}$



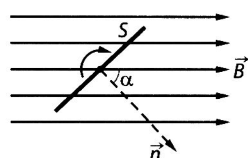
140 pav.

Elektriniai virpesiai skirstomi į laisvuosius ir priverstinius, idealius (harmoninius) ir realius. Laisvųjų idealių virpesių metu galioja elektros energijos tvermės dėsnis. Jei virpesių kontūro $R > 0$, tai virpesys yra slopinamasis, nes elektros energija virsta laidininkų šilumine energija. Nors realūs virpesiai slopinami, galima pasiekti, kad tam tikrą laiką jie neišnyktų. Tam kuriama **autosvyravimų (autovirpesių) sistema**. Šią sistemą sudaro: 1) svyruoklė (virpesių kontūras); 2) energijos šaltinis ir įrenginys, reguliuojantis energijos papildymą. Mechanikoje tokia autosvyravimų sistema yra laikrodžio mechanizmas. Elektrodinamikoje autovirpesių sistema yra tranzistorinis arba lempinis generatorius (140 pav.). Generatoriaus virpesių kontūre vyksta $T = 2\pi\sqrt{LC}$ elektriniai virpesiai, kurie yra slopinami. Kontūre vykstantis virpesys sukelia analogišką virpesį tranzistoriaus emiterio-bazės grandinėje ir taip atidaro arba uždaro tranzistorių. Kai tranzistorius atidarytas, U_k šaltinis kompensuoja virpesių kontūro elektros energijos nuostolius.

2. Kintamoji srovė

Kintamoji elektros srovė – tai priverstiniai elektriniai virpesiai, kurie gali vykti bet kokiomis savybėmis pasižyminčioje grandinėje. Jiems sukelti ir palaikyti reikalingas srovės šaltinis. Kadangi grandinėje tekančios srovės stipris tiesiogiai proporcingas šaltinio elektrovarai, priverstinių elektrinių virpesių šaltinio elektrovara turi periodiškai kisti.*

Toks šaltinis yra kintamosios srovės generatorius. Jo veikimas pagrįstas elektromagnetine indukcija. Vienalyčiame magnetiniame lauke (tarp magneto arba elektromagneto polių) pastoviu kampiniu greičiu sukamas laidus, turintis N vijų rėmelis yra generatoriaus modelis (žr. 141 pav.). Šaltinio poliai – į rėmelį suvynioto laido galai. Jų įelektrinimas ir įtampa tarp jų periodiškai kinta. Jei pradiniu momentu magnetinio lauko linijos yra statmenos rėmelio plokštumai, tai generatoriaus elektrovara:



141 pav.

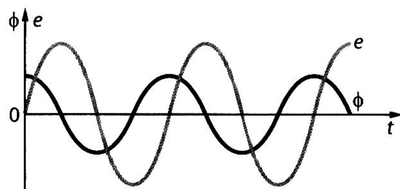
* Periodiškai kintamų fizikinių dydžių momentinės vertės žymimos mažosiomis raidėmis.

$$e = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -N\Phi'_t,$$

$$e = -N(BS\cos\alpha)'_t = -NBS\left(\cos\frac{2\pi}{T}t\right)'_t = NBS\frac{2\pi}{T}t = \mathcal{E}_m \sin\frac{2\pi}{T}t =$$

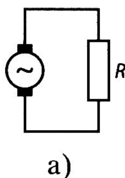
$$= \mathcal{E}_m \sin\frac{2\pi}{T}t = \mathcal{E}_m \sin 2\pi t = \mathcal{E}_m \sin\omega t.$$

Iš šių formulių matyti, kad elektrovaros kitimas faze $\frac{\pi}{2}$ rad atsilieka nuo magnetinio lauko srauto kitimo (142 pav.). Elektrovaros amplitudės formulėse $\mathcal{E}_m = NBS\frac{2\pi}{T} = NBS\,2\pi f = NBS\omega$; čia π yra tik skaičius ~ 3,14. Kad būtų patogiau generatorių prijungti prie grandinės, pramoninių generatorių apvija (rėmelis) yra stabiliai įtvirtinta generatoriaus korpuse (statorius), o sukamas elektromagnetas (rotorius). Standartinių generatorių elektrovara kinta 50 Hz dažniu. Jei generatoriaus rotoriuje yra ne viena elektromagneto polių pora, bet N porų, toks pat elektrovaros kitimo dažnis gaunamas N kartų sulėtinus rotoriaus (induktoriaus) sukimą. Daugelio generatorių apvijų varža yra palyginti maža, todėl įtampa generatoriaus gnybtuose praktiškai lygi jo elektrovarai: $u \approx e$. Srovės stipris prie generatoriaus prijungtoje grandinėje kinta tuo pačiu dažniu kaip ir įtampa jos galuose, tačiau ne visada srovės stiprio ir įtampos kitimai savo fazėmis sutampa. Bendruoju atveju, jei įtampa grandinės dalyje $u = U_m \sin\omega t$, tai srovės stipris $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$; čia $-\frac{\pi}{2} \le \varphi \le \frac{\pi}{2}$ yra srovės stiprio ir įtampos kitimų fazių skirtumas, priklausantis nuo grandinės savybių bei įtampos kitimo dažnio.

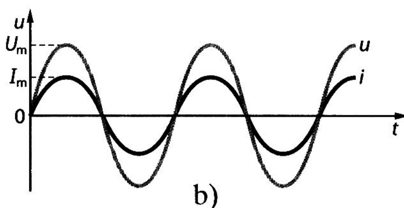


142 pav.

Kai išorinę grandinę sudaro rezistorius (143 pav., *a*), kuris tik trukdo tekėti srovei, tai srovės stiprio kitimas šioje grandinėje savo faze sutampa su įtampos kitimu (143 pav., *b*). Jei $u = U_m \sin\omega t$, tai $i = I_m \sin\omega t$. Tokiu



a)

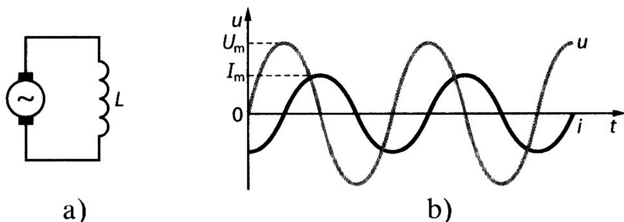


b)

143 pav.

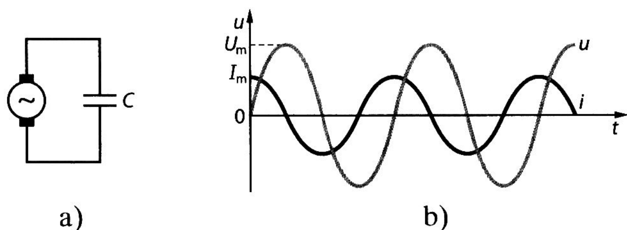
atveju fazių skirtumo tarp šių dydžių kitimo nėra: $\varphi = 0$. Tą pačią akimirką esančioms u ir i reikšmėms galioja Omo dėsnis grandinės daliai: $i = \frac{u}{R}$,* $I_m = \frac{U_m}{R}$.

Kai kintamoji srovė teka ritėje (144 pav., *a*), kuri priešinasi srovės kitimui, srovės stiprio kitimas faze $\frac{\pi}{2}$ atsilieka nuo įtampos kitimo (144 pav., *b*): $i = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$. Tokiu atveju pagal Omo dėsnį, jei skaičiuojame srovės stiprį šią akimirką, įtampą turime imti buvusią prieš ketvirtį periodo: $i = \frac{u}{X_L}$, $I_m = \frac{U_m}{X_L}$. $X_L = \omega L = 2\pi f L$ – induktyvioji varža. (Nuolatinei srovei $X_L = 0$, nes $f = 0$.)



144 pav.

Kai prie nuolatinės srovės šaltinio prijungiamas kondensatorius, srovė grandinėje teka labai trumpai – kol kondensatorius pakraunamas. Priešingai, grandinėje, sudarytoje iš generatoriaus ir kondensatoriaus (145 pav., *a*), srovė teka visą laiką, nes kondensatorius ne tik pakraunamas, bet ir iškraunamas, o vėliau pakraunamas priešingai. Šiuo atveju srovės stiprio kitimas lenkia įtampos kitimą faze $\frac{\pi}{2}$ (145 pav., *b*). Imdami šią



145 pav.

* Čia i ir u – periodiškai kintami fizikiniai dydžiai (momentinės vertės).

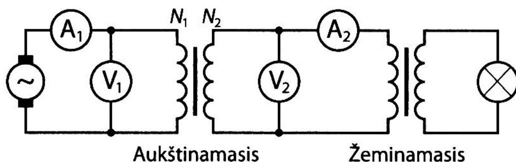
akimirką esančios įtampos reikšmę, apskaičiuosime srovės, kuri tekėjo prieš ketvirtį periodo, stiprį: $i=\frac{u}{X_C}$, $I_m=\frac{U_m}{X_L}$. $X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi f C}$ – talpinė varža (nuolatinei srovei $X_C-\infty$, nes $f=0$). Momentinė galia kintamosios srovės grandinės dalyje

$$p=ui=U_m\sin\omega t\cdot I_m\sin(\omega t+\varphi)=\frac{U_m I_m}{2}[\sin(2\omega t+\varphi)+\cos\varphi].$$

Kadangi momentinė galia periodiškai kinta, galime rasti vidutinę galią: $P=\overline{p}=\frac{U_m I_m}{2}\cos\varphi$. Kai grandinėje yra tik rezistorius ($\varphi=0$ rad), tai $P=\frac{U_m I_m}{2}=\frac{I_m^2}{2}R=\frac{U_m^2}{2\cdot R}=I^2R=\frac{U^2}{R}$. Kintamoji srovė apibūdinama efektine kintamosios srovės verte: $I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$. Ja laikoma tokia nuolatinės srovės stiprio vertė, kuriai tekant galia grandinėje bus lygi kintamosios srovės vidutinei galiai. Analogiškai apibrėžiama ir įtampos efektinė vertė. Matavimo prietaisai (voltmetras, ampermetras) matuoja efektines vertes. (Buityje naudojamo elektros tinklo efektinė įtampa $U=220$ V ir dažnis $f=50$ Hz).

Kai grandinėje yra tik ritė arba kondensatorius ($\varphi=\pm\frac{\pi}{2}$ rad), vidutinė galia lygi nuliui. Todėl induktyvioji ir talpinė varžos vadinamos reaktyviosiomis (nes grandinė nenaudoja šaltinio energijos), o rezistoriaus varža – aktyviąja.

Kadangi elektros energijos perdavimo linijų laidų aktyvioji varža nėra lygi nuliui, siekiant sumažinti elektros energijos nuostolius mažinamas srovės stipris ($Q=I^2Rt$ – **Džaulio ir Lenco dėsnis**). Elektros srovės galia grandinėje liks nepakitusi, jei mažindami srovės stiprį tiek pat kartų padidinsime įtampą grandinės galuose. Todėl siekiant sumažinti energijos nuostolius perdavimo linijos pradžioje (prie elektrinės) įtampa yra aukštinama, o linijos gale (kur yra vartotojai) – žeminama (146 pav.). Įtampa



146 pav.

ir srovės stipris keičiami **transformatoriumi**. Pagal paskirtį transformatoriai yra dviejų rūšių: aukštinamieji ir žeminamieji. Transformatoriaus veikimas pagrįstas elektromagnetine indukcija ir saviindukcija. Transformatorių sudaro dvi skirtingą vijų skaičių turinčios ritės ir feromagnetinė šerdis. Prie generatoriaus jungiama ritė (apvija) vadinama pirmine, o prie perdavimo linijos – antrine. Pirmine apvija tekančios kintamosios srovės magnetinis laukas kisdamas kiekvienoje abiejų apvijų vijoje indukuoja elektrovarą $e = -\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Pirminėje apvijoje, turinčioje N_1 vijų, indukuotoji elektrovara $\mathcal{E}_1 = N_1 e$, o antrinėje – $\mathcal{E}_2 = N_2 e$. Pirminėje apvijoje saviindukcijos elektrovara yra priešinga (fazių skirtumas π rad) generatoriaus elektrovarai, o amplitudės beveik lygios $\mathcal{E}_1 \approx -\mathcal{E}_G$. Kai transformatorius dirba tuščiąja eiga (antrinė grandinė atvira), tokia būsena nusistovi tekant labai silpnai srovei, todėl energijos jis beveik nevartoja. Sujungus antrinės apvijos grandinę, joje tekančios srovės magnetinis laukas keičia buvusį lauką. Padidėjus $\mathcal{E}_1$ ir $\mathcal{E}_G$ skirtumui, didėja srovės stipris pirminėje grandinėje, o kartu pakinta šios srovės magnetinis laukas. Dėl šio pakitimo vėl $\mathcal{E}_1 \approx -\mathcal{E}_G$, tačiau tik tuo atveju, kai teka stipresnė srovė. Kintant antrinės grandinės apkrovai (arba joje tekančios srovės stiprio efektinei vertei), keičiasi srovės stipris ir pirminėje grandinėje. Kadangi apvijų aktyvioji varža nedidelė, galima laikyti, kad $U_1 \approx \mathcal{E}_1$ ir $U_2 \approx \mathcal{E}_2$. Vijų skaičiaus pirminėje ir antrinėje apvijose santykis vadinamas **transformatoriaus transformacijos koeficientu:**

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

(Įtampos aukštinimo transformatoriaus koeficientas k < 1, o žeminimo k > 1.) Tas pats transformatorius gali ir aukštinti, ir žeminti įtampą (keičiant jungimą). Kadangi energijos nuostoliai transformatoriuje yra maži (1–2 %, tai pasiekiama transformatoriaus šerdį gaminant iš izoliuotų plieninių plokščių, kurios sumažina šiluminius energijos nuostolius, atsirandančius dėl sūkurinių elektros srovių), galima laikyti, kad srovės galia pirminėje ir antrinėje apvijose yra vienoda, t. y. $P_1 \approx P_2$. Todėl $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$ arba $k = \dfrac{N_1}{N_2} = \dfrac{U_1}{U_2} = \dfrac{I_2}{I_1}$. Aukštinantis įtampą transformatorius ($k < 1$) srovės stiprį mažina, o žeminantis įtampą ($k > 1$) stiprį didina.

3. Banginiai procesai

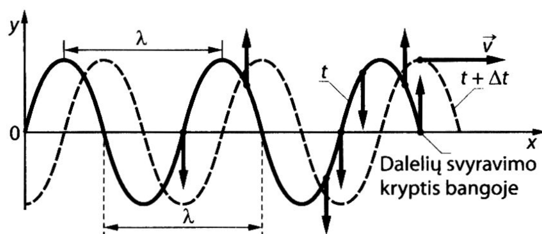
Bangos yra dviejų rūšių: mechaninės ir elektromagnetinės. **Mechaninė banga** (bangavimas) – tampriose terpėse vykstantis reiškinys – terpės dalelių priverstinių svyravimų sklidimas. **Elektromagnetinė banga** – tai sklindantis elektromagnetinis laukas (neturinti medžiagos savybių materija). Elektromagnetinis laukas sklinda vykstant elektromagnetiniam virpesiui. Jo metu periodiškai kintantys elektrinis ir magnetinis laukai sukuria vienas kitą ir taip sklinda erdvėje. Mechaninio bangavimo ir elektromagnetinio lauko sklidimo reiškiniams būdingi dėsningumai yra analogiški, todėl jie apibūdinami tais pačiais fizikiniais dydžiais. Vienas tokių dydžių yra medžiagos dalelių svyravimo (elektromagnetinio virpesio) dažnis f $\left(\text{periodo } T = \frac{1}{f}\right)$, kuris priklauso nuo šaltinio, sukeliančio bangavimą. Bangavimas apibūdinamas bangos sklidimo greičiu. Elektromagnetinis laukas tuštumoje sklinda $c = 300\,000\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$ greičiu. Laidžiose elektromagnetiniam laukui medžiagose elektromagnetinės bangos sklidimo greitis $v = \frac{c}{n}$; čia n – terpės savybę apibūdinantis dydis – **optinis tankis**. Mechaninių bangų sklidimo greitis taip pat priklauso nuo terpės savybių. Dujose mechaninės bangos sklinda lėčiausiai, kietose medžiagose – greičiausiai.

Atstumas, kurį banga nusklinda per periodą, vadinamas **bangos ilgiu** λ („lambda“): $\lambda = vT = \frac{v}{f}$. Kadangi bangai pereinant iš vienos terpės į kitą kinta sklidimo greitis, atitinkamai kinta ir bangos ilgis, o bangavimo dažnis lieka toks pat.

Bangos sklidimo kryptis vadinama **bangos spinduliu**. Einant bangos sklidimo kryptimi, svyravimai savo faze atsilieka nuo juos sukėlusių svyravimų. Taškų, nutolusių spindulio kryptimi λ atstumu, svyravimų fazės skiriasi 2π rad. Taškų, kurie svyruoja ta pačia faze, visuma vadinama **bangos paviršiumi**. Bangos spindulys visada statmenas bangos paviršiui. Pagal bangų paviršiaus formą jos skirstomos: erdvėje – į plokščiąsias ir sferines (rutulines), plokštumoje – į tiesiąsias ir apskritimines. Bangavimą sukeliantis šaltinis atlieka darbą, priversdamas svyruoti pirmąsias terpės daleles, t. y. suteikia joms svyravimo (mechaninę) energiją. Savo

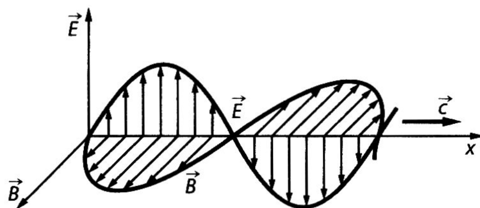
ruožtu šios dalelės atlieka darbą, išjudindamos kitas terpės daleles, t. y. suteikia joms energijos, todėl sakoma, kad bangavimo metu sklinda energija. Jei bangavimo šaltinis nustoja veikti, „perdavusios" energiją dalelės lieka pusiausviros. Sklindant tiesiajai (plokščiajai) bangai, svyravimo amplitudė nekinta, nes vienos dalelės energija „perduodama" vienai dalelei. Sklindant apskritiminei (sferinei) bangai, amplitudė mažėja, nes visų ta pačia faze svyruojančių dalelių energija tenka didesniam skaičiui dalelių, todėl kiekvienos dalelės energija yra mažesnė. Pagal dalelių svyravimo kryptį ir svyravimo sklidimo kryptį mechaninės bangos skirstomos į skersines ir išilgines. Banga, kurioje dalelių svyravimo kryptis yra statmena sklidimo krypčiai, vadinama **skersine**, o banga, kurioje svyravimo kryptis ir jo sklidimo kryptis yra vienoje tiesėje, – **išilgine**. Sklindant skersinei bangai, tamprioje terpėje atsiranda šlyties deformacija (būdinga tik kietiems kūnams), o sklindant išilginei bangai – tempimo ir gniuždymo deformacija (būdinga visoms terpėms). Skersinės bangos sklinda tik kietomis terpėmis ir skysčių paviršiais, išilginės – visomis medžiagomis. Kietuose kūnuose išilginių bangų greitis didesnis negu skersinių, todėl, remiantis šia jų savybe, apskaičiuojamas atstumas nuo žemės drebėjimo epicentro iki seisminės stoties.

Nors išilginėje bangoje susidaro terpės dalelių sutankėjimai ir praretėjimai, pateiktas brėžinys tinka ne tik skersinei, bet ir išilginei bangai pavaizduoti (147 pav.). Šiame brėžinyje x ašis yra bangos spindulys, o kartu ir pusiausvirų terpės dalelių koordinačių ašis. y ašis yra dalelių nuokrypio nuo pusiausvyros padėties ašis. Punktyrine linija pavaizduota $\vec{v}$ greičiu sklindančios bangos dalelių padėtis praėjus Δt laiko tarpui. λ – bangos ilgis, trumpiausias atstumas tarp bangos taškų, kurių svyravimų fazės skiriasi 2π rad. Skersinės bangos x ir y ašys viena kitai statmenos, o išilginės – vienoje tiesėje.



147 pav.

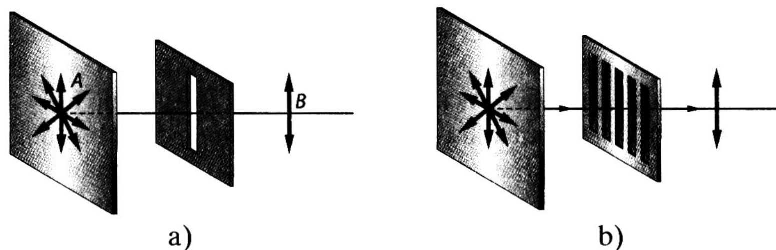
Elektromagnetinės bangos elektrinis ir magnetinis laukai statmeni vienas kitam ir sklidimo krypčiai, todėl šios bangos taip pat laikomos skersinėmis (148 pav.). Pateiktame brėžinyje x ašis – erdvės taškų koordinačių ašis, sutampanti su elektromagnetinės bangos sklidimo kryptimi (greičiu $\vec{c}$), o $\vec{E}$ ir $\vec{B}$ – elektrinio lauko stipris ir magnetinio lauko indukcija tuose taškuose nagrinėjamu momentu.



148 pav.

Skersinėms bangoms būdingas poliarizacijos reiškinys (149 pav., *a*). Jei virvutėje sukelsime bet kokios krypties skersinius svyravimus (*A*), tai už bangą poliarizuojančio plyšio virvute sklis tik išilgai plyšio vykstantys svyravimai (*B*). Analogiškai elektromagnetinę bangą poliarizuoja grotelės, sudarytos iš lygiagrečių laidžių virbų (149 pav., *b*).

Ir mechaninių, ir elektromagnetinių bangų sklidimui būdingi šie dėsniai: tiesiaeigio bangų sklidimo, atspindžio, lūžio.

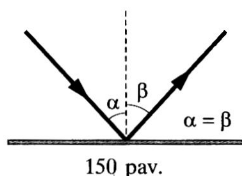


a) b)

149 pav.

Tiesiaeigio bangų sklidimo dėsnis teigia, kad vienalytėje terpėje bangos sklinda tiesiai (bangų spinduliai yra tiesės). Dėl šio dėsningumo bangų kelyje atsiradus kliūčiai, už jos bangos nesklinda (susidaro šešėlis). Jei bangų šaltinis nėra materialusis taškas, tuomet už kliūties susidaro ne tik šešėlis, bet ir pusšešėlis. Tačiau kai kliūties matmenys yra bangos ilgio dydžio arba mažesni, tiesiaeigio sklidimo dėsnis nebegalioja – bangos aplenkia kliūtį (užlinksta). Šis reiškinys vadinamas **bangų difrakcija**. Kuo mažesni kliūties matmenys lyginant su sklindančios bangos ilgiu, tuo labiau pasireiškia difrakcija.

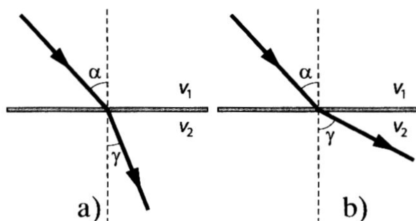
Ties riba, skiriančia vieną terpę nuo kitos (kliūties paviršiumi), bangos keičia sklidimo kryptį. Dalis bangos (kartais ir visa) atsispindi. Bangos



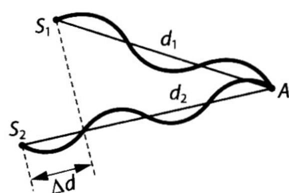
150 pav.

atspindžiui būdingas **atspindžio dėsnis** (žr. 150 pav.): krintantysis spindulys (sklidimo kryptis iki atspindžio), atsispindėjęs spindulys (kryptis po atspindžio) ir statmuo paviršiui (dviejų terpių ribai) atspindžio taške yra vienoje plokštumoje; atspindžio kampas β (kampas tarp statmens ir atsispindėjusio spindulio) lygus kritimo kampui α (kampas tarp statmens ir krintančiojo spindulio).

Bangai pasiekus terpes skiriančią ribą, dalis jos (kartais ir visa) gali pereiti į antrąją terpę. Bangai pereinant iš vienos terpės į kitą, pakinta jos sklidimo greitis, o kartu ir kryptis – vyksta lūžio reiškinys. Jam būdingas dėsningumas nusakomas **lūžio dėsniu**: krintantysis spindulys, lūžęs spindulys (sklidimo kryptis antroje terpėje) bei statmuo terpių ribai lūžio taške yra vienoje plokštumoje; kritimo kampo α ir lūžio kampo γ (kampo tarp lūžusio spindulio ir statmens) sinusų santykis toms dviem terpėms yra pastovus dydis: $\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n$. Jis priklauso nuo bangų sklidimo greičių tose terpėse santykio: $n = \frac{v_1}{v_2}$, o greitis – nuo pačių terpių. Jei bangai pereinant iš vienos terpės į kitą, jos sklidimo greitis sumažėja ($v_2 < v_1$), spindulys lūžta link statmens (artėja prie jo) $\gamma < \alpha$, jei greitis padidėja ($v_2 > v_1$), spindulys lūžta nuo statmens (tolsta nuo jo) $\gamma > \alpha$ (151 pav., *a, b*). Jeigu į tam tikrą erdvės tašką atsklinda dvi arba daugiau bangų, įvyksta jų sudėtis. Bangos, kurių ilgiai ir kitimo (svyravimo) dažniai vienodi, vadinamos **koherentinėmis**. Koherentinių bangų sudėties rezultatas įvairiuose erdvės taškuose yra pastovus ir ilgainiui nekinta. Vienose vietose susidėdamos bangos stiprina vienos kitas, kitose – silpnina. Taškai, kur bangos maksimaliai sustiprina viena kitą, vadinami maksimumo (*max*) taškais, o kur panaikina viena kitą – minimumo (*min*). Bangų sudėtis, kurios metu susidaro pastovus vaizdas iš *max* ir *min* taškų, vadinama **interferencijos reiškiniu**. Jeigu iš šaltinių S_1 ir S_2 sklinda dvi koherentinės bangos (152 pav.), tai taške *A* bus interferencinio vaizdo

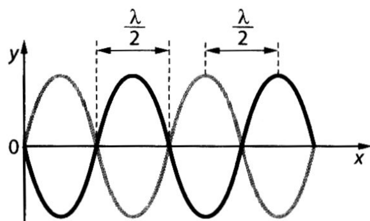


151 pav.



152 pav.

maksimumas, jei bangų nueitų kelių d_2 ir d_1 skirtumas (eigos skirtumas) Δd atitiks lyginį pusbangių skaičių: $\Delta d = 2k\frac{\lambda}{2}$; čia $k = 0;1;2;3 \ldots$. Kai bangų nueitų kelių skirtumas atitinka nelyginį pusbangių skaičių, susidaro interferencinio vaizdo minimumas: $\Delta d = (2k + 1)\,\frac{\lambda}{2}$; čia $k = 0;1;2;3 \ldots$. Kad šias sąlygas tenkinančiuose taškuose būtų maksimumas ir minimumas, bangos turi būti ne tik koherentinės, bet ir vienodų amplitudžių bei sukeliamos sinchroniškai. Jei šaltiniai tuo pačiu metu sukeltų priešingų fazių bangavimus, tai *max* ir *min* taškai pasikeistų vietomis. Kai dvi koherentinės bangos sklinda viena priešais kitą, jų interferencijos rezultatas yra **stovinti banga**, kuri neperduoda energijos, nes viena priešais kitą sklindančios bangos neša vienodą energijos kiekį priešingomis kryptimis. Stovinčios bangos minimumo taškai vadinami mazgais (jie nesvyruoja), o maksimumo – pūpsniais (žr. 153 pav.). Atstumas tarp dviejų gretimų stovinčios bangos mazgų arba pūpsnių lygus pusei bangos ilgio $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$.



153 pav.

Vienas iš mechaninių bangų pavyzdžių yra **garsas**. Žmogaus ausis jautri jį supančios terpės (paprastai oro) svyravimams, kurių dažnis siekia nuo 16–20 iki 20 000 Hz. Šio dažnio bangos vadinamos garsu. Mažesnio negu 16–20 Hz dažnio bangos vadinamos **infragarsu**, o didesnio negu 20 000 Hz dažnio – **ultragarsu**.

Garso bangos yra išilginės. Jos sklinda dujomis, skysčiais ir kietaisiais kūnais, o nesklinda vakuumu. Garso greitis priklauso nuo terpės, jos temperatūros. Greičiausiai garsas sklinda kietaisiais kūnais, lėčiausiai – dujomis. Garsui pereinant iš vienos terpės į kitą, jo bangos ilgis pakinta tiek kartų, kiek kartų pakinta jos greitis, o dažnis išlieka tas pats ($v = \lambda f$).

Harmoningai svyruojančio kūno sukelta garso banga vadinama **muzikiniu tonu**. Kuo didesnis svyravimo dažnis garso bangoje, tuo aukštesnis tonas. Dažniausiai garsą sukeliančio kūno svyravimas yra sudėtingas. Jame tuo pačiu metu, be pagrindinio svyravimo, galima rasti 2, 3, 4 ir daugiau kartų didesnio dažnio, tačiau silpnesnius svyravimus.

Šie aukštesnio tono garsai vadinami pagrindinio tono virštoniais (obertonais). Nuo virštonių kiekio priklauso garso atspalvis – tembras, todėl įvairiais instrumentais sukelti to paties tono garsai nėra visiškai vienodi. Kita garso charakteristika yra **garso stipris**. Kuo didesnė garso šaltinio svyravimo amplitudė, tuo didesnę energiją jis suteikia terpės dalelėms, o šios stipriau veikia klausos organus (girdime stipresnį garsą). Garso stipris – tai 1 m^2 bangos paviršiaus plote esančių dalelių svyravimo galia. Jis matuojamas vatais kvadratiniam metrui $\left(\frac{W}{m^2}\right)$. Garso stipris yra fizikinė, prietaisais matuojama garso bangos charakteristika. Žmogaus ausis nevienodai jautri įvairaus dažnio garso bangoms, todėl skirtingo dažnio vienodo stiprio bangų sukeltas poveikis atrodo skirtingas. Praktikoje klausos organais pajuntamą garsą apibūdina **garsumas**, matuojamas belais (B) (dažniausiai decibelais (dB)). Kuo garsas stipresnis, tuo garsumas didesnis, tačiau jų tarpusavio sąryšis priklauso nuo garso bangos dažnio.

Kai garso banga statmenai krenta į daug didesnės už bangos ilgį kliūties paviršių, ji atsispindi ir grįžta atgal. Jeigu atstumas iki kliūties pakankamai didelis (atsispindėjęs garsas grįžta ne mažiau kaip po 0,1 s), išgirstame pačių sukeltą sugrįžusį garsą – **aidą**. Atsispindėjęs nuo artimų kliūčių garsas susilieja su pirminiu ir jį sustiprina, todėl aido negirdime. Kai tolstame nuo įvairių dažnių bangas sukeliančio garso šaltinio, girdimo garso tonas žemėja, nes pasitaikančias kliūtis geriau aplenkia didesnio ilgio bangos. Garso stiprinimui pritaikomas **akustinio rezonanso reiškinys**. Pasiekusi kūnus, garso banga priverčia juos svyruoti. Jeigu to kūno savųjų svyravimų dažnis sutampa su garso bangos dažniu, įvyksta rezonansas. Jo metu sukeliamų priverstinių svyravimų amplitudė yra didžiausia. Daugelis muzikos instrumentų turi rezonatorius. Juose esantis oro stulpas gali atlikti tam tikro dažnio laisvuosius svyravimus, t. y. rezonuoti į atsklindantį garsą ir taip jį sustiprinti.

Platų pritaikymą turi ir garsas, kurio mes negirdime – ultragarsas. Kadangi ultragarso bangos ilgis kur kas mažesnis už garso bangos ilgį, jis gali atsispindėti nuo daug mažesnių kliūčių. Ši ultragarso savybė taikoma echolotams – laivuose naudojamiems prietaisams, kurie skirti vandens telkinių gyliui matuoti, įvairiems objektams vandenyje surasti ir atstumui iki jų nustatyti. Taip pat ultragarsas naudojamas medicinoje, ultragarsiniuose defektoskopuose.

Elektromagnetinių bangų skalė labai plati, todėl, pagal skirtingą dažnį (bangos ilgį), jų savybės ir pritaikymas labai įvairūs. Visa skalė skirstoma į 6 diapazonus: 1) radijo bangos; 2) infraraudonieji spinduliai; 3) šviesa; 4) ultravioletiniai spinduliai; 5) rentgeno spinduliai; 6) gama spinduliai. Griežtų ribų, skiriančių vieną diapazoną nuo kito, nėra, todėl nurodomos apytikslės jų ribos.

Radijo bangos. Šiam diapazonui priklauso elektromagnetinės bangos, kurių ilgis svyruoja nuo 10 km iki 1 mm. Tai radijo ryšiui, televizijai, radiolokacijai naudojamos bangos. Radijo ryšio metu elektromagnetinėmis bangomis perduodama garsinė informacija.

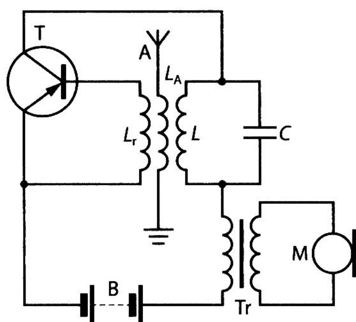
Informacijos perdavimas vyksta šiais etapais (pagrindinė schema – 154 pav.):

1. Mikrofonas (M) garsą (mechanines bangas) paverčia jį atitinkančiu žemo (garsinio) dažnio elektriniu signalu (155 pav., *a*).

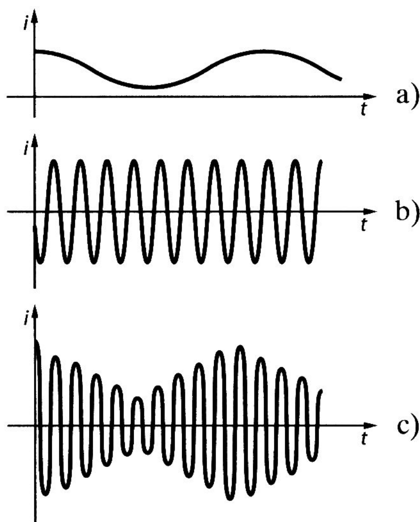
2. Tranzistoriniu generatoriumi gaunamas aukštojo dažnio elektrinis virpesys (155 pav., *b*).

3. Aukštojo dažnio elektrinis signalas moduliuojamas žemojo dažnio elektriniu signalu. Moduliuoti galima amplitudę ir dažnį. Moduliuojant nešančiojo (aukštojo dažnio) signalo amplitudė (155 pav., *c*) arba dažnis priverčiami kisti pagal garsinio dažnio signalą.

4. Moduliuotas aukštojo dažnio elektrinis virpesys perduodamas į atvirąjį virpesių kontūrą (siųstuvo anteną), kur sukelia priverstinį elektrinį virpesį. Siųstuvo antena (A) išspinduliuoja aukštojo dažnio moduliuotą elektromagnetinę bangą. Elektromagnetinio



154 pav.



155 pav.

lauko kitimo dažnis priklauso nuo siųstuvo generatoriaus virpesių kontūro talpos ir induktyvumo: $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Informacijos priėmimas vyksta šiais etapais (pagrindinė schema 156 pav.):

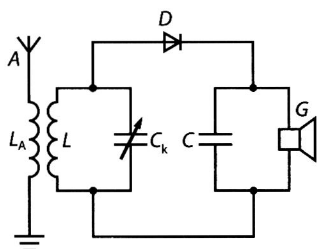
1. Atsklidusi iki priėmimo antenos (atvirojo virpesių kontūro A) elektromagnetinė banga jame sukelia priverstinį aukštojo dažnio moduliuotą elektrinį virpesį (157 pav., *a*).

2. Kadangi vienu metu anteną veikia daugelio radijo stočių išspinduliuotos elektromagnetinės bangos, visi antenos priimti atitinkamų dažnių elektriniai signalai perduodami į uždarąjį virpesių kontūrą (LC_K). Vienas signalas, kurio kitimo dažnis sutampa su virpesių kontūre galimų laisvųjų virpesių dažniu, dėl rezonanso sustiprėja tiek, kad lyginant su juo kitų galima nepaisyti. Keičiant virpesių kontūro kondensatoriaus talpą C_K, imtuvas suderinamas su norimos stoties programa.

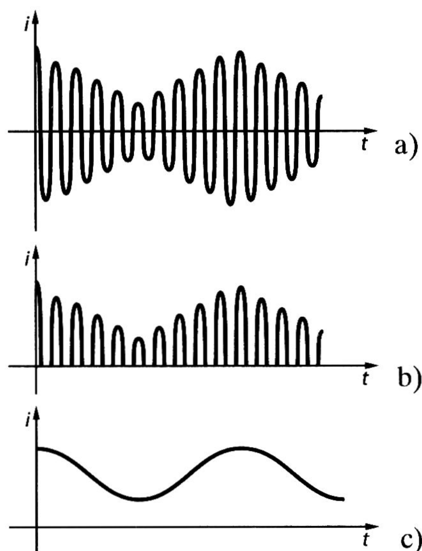
3. Detektorius (diodas *D*) ir su telefonu arba garsiakalbiu (*G*) lygiagrečiai sujungtas kondensatorius (*C*) iš aukštojo dažnio moduliuoto signalo išskiria žemojo dažnio signalą. (157 pav., *b* pavaizduotas diodu perėjęs elektrinis signalas, 157 pav., *c* – žemojo dažnio elektrinis signalas telefone arba garsiakalbyje.)

4. Telefonas (garsiakalbis) garsinio dažnio elektrinį signalą paverčia mechanine banga – garsu.

Energijos šaltinis paprasčiausiame detektoriniame imtuve yra anteną veikiantis elektromagnetinis laukas.



156 pav.



157 pav.

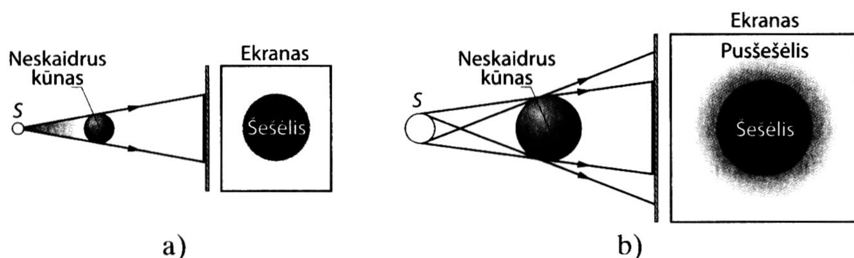
Televizija – vaizdinės informacijos perdavimas radijo bangomis. Televizijos ryšio principai iš esmės analogiški radijo ryšio principams, skiriasi tik pirmoji ir paskutinė grandys. Perdavimui vietoj mikrofono naudojama televizijos kamera, priėmimui vietoj telefono (garsiakalbio) – kineskopas (elektroninis vamzdis). Televizijos kameroje ant specialaus elektroninio vamzdžio ekrano esantis vaizdas pakeičiamas elektriniu signalu (videosignalu); tai elektros srovė, kurios stipris atitinka perduodamo vaizdo taškų šviesumą. Šiuo videosignalu moduliuojamas nešantysis signalas. Televizoriaus kineskopo ekrane po detekcijos iš vėl turimo videosignalo atkuriamas vaizdas. Televizijos ryšiui naudojamos metrinio ir decimetrinio diapazono radijo bangos. Kadangi šio diapazono bangoms aplenkiant Žemės paviršiaus kreivumą jos teužlinksta silpnai, maždaug kas 50 kilometrų statomi retransliatoriai.

Trečioji radijo bangų pritaikymo sritis – **radiolokacija** – objektų suradimas ir atstumo iki jų nustatymas. Radiolokacija pagrįsta elektromagnetinių bangų atspindžiu nuo objektų. Radiolokatorių sudaro siųstuvas su kryptingai išspinduliuojančia radijo bangas antena ir imtuvas, priimantis atsispindėjusias bangas (jų abiejų antena yra ta pati). Radiolokatoriaus siųstuvas ir imtuvas dirba impulsiniu režimu. Radiolokatorius pasiunčia trumpus (maždaug 10^{-6} s) radijo impulsus, po to pereina į priėmimo režimą. Impulso priėmimo intervalas maždaug 10^3 karto ilgesnis už impulso trukmę. Nuo jo priklauso didžiausias objekto suradimo nuotolis. Per šį intervalą elektromagnetinė banga turi nueiti iki objekto ir atsispindėjusi grįžti atgal: $s = \frac{ct}{2}$. Nuo impulso trukmės priklauso mažiausias nuotolis, kuriame esantis objektas bus pastebimas. Radiolokacijai naudojamos centimetrinio ir milimetrinio diapazono bangos.

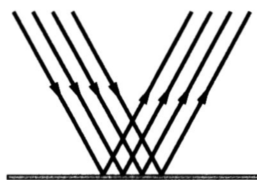
Infraraudonieji (šiluminiai) spinduliai. Trumpesnių už milimetrines elektromagnetinių bangų dirbtiniu būdu gauti neįmanoma – elektrinių virpesių generatoriaus galimybės yra ribotos. Tačiau šių bangų šaltinius sukūrė pati gamta. Nagrinėdami šiluminę apykaitą (šilumos perdavimą) minėjome vieną iš būdų – spinduliavimą. Kūną sudarantys atomai ir molekulės, vykstant pakitimams juose, spinduliuoja elektromagnetines bangas. Spinduliavimo metu molekulių (atomų) energija mažėja. Ji atstatoma dalelėms susiduriant. Kuo aukštesnė kūno temperatūra, tuo intensyvesnis šiluminis judėjimas, stipresni susidūrimų smūgiai, įgyjamos didesnės dalelių energijos. Pavienė dalelė elektromagnetinį lauką

spinduliuoja labai trumpai. Išspinduliuotos bangos ilgis tuo trumpesnis, kuo labiau sumažėja dalelės energija spinduliavimo metu. Todėl kylant kūno temperatūrai trumpėja jo spinduliuojamų elektromagnetinių bangų ilgis. Galimas ir atvirkščias procesas – dalelės gali ne tik spinduliuoti elektromagnetinį lauką, bet ir sugerti jį. Sugeriant padidėja dalelių energija. Be spinduliavimo, šią energiją dalelės gali prarasti šiluminių smūgių metu. Tokiu atveju po susidūrimo dalelių kinetinės energijos bus didesnės nei prieš susiduriant, todėl kūnas sugerdamas šiluminius spindulius šils. Kūnas gali būti įkaitintas tiek, kad spinduliuotų tokio ilgio bangas, kurioms jautri žmogaus akis, t. y. šviesą (pirmiausia – raudoną). Šiluminiai spinduliai (jų bangos ilgis didesnis už raudonos šviesos bangos ilgį) vadinami infraraudonaisiais. Naudojant infraraudoniesiems spinduliams jautrias fotojuostas galima fotografuoti net naktį. Yra sukurti naktinio matymo prietaisai, kurie infraraudonuosius spindulius paverčia regimaisiais.

Šviesa. Žmogaus akis jautri elektromagnetinėms bangoms, kurios visoje bangų skalėje užima labai nedidelę sritį. Matomos šviesos bangų ilgiai yra nuo 760 nm iki 400 nm. Dėl tiesiaeigio šviesos sklidimo už neskaidrių kūnų susidaro šešėliai ir pusšešėliai. Jei šviesos šaltinis *S* yra taškinis, tai susidaro tik šešėlis, o jei nėra taškinis – tada šešėlį supa pusšešėlis (158 pav., *a, b*).



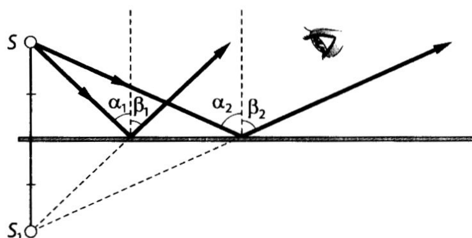
158 pav.



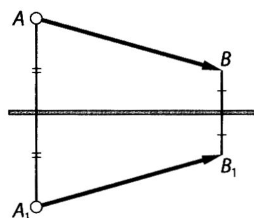
159 pav.

Nuo neskaidrių paviršių šviesa atsispindi. Jei atspindintis paviršius lygus (nelygumai mažesni už bangos ilgį) – šviesa atsispindi taisyklingai (159 pav.). Toks atspindys, o kartu ir paviršius, vadinamas **veidrodiniu**. Žiūrėdami į veidrodinį paviršių matome šviesos šaltinio

S atvaizdą S_1 (160 pav.). Atvaizdas vadinamas menamuoju, nes akiai tik atrodo, kad spinduliai sklinda iš taško S_1. Norint veidrodyje gautą daikto atvaizdą pavaizduoti brėžiniu, reikia iš daikto AB viršūnių nubrėžti statmenis į veidrodį ir juos pratęsti už veidrodžio tokiu pat atstumu (161 pav.). Sujungę taškus gausime daikto atvaizdą A_1B_1 veidrodyje. Jis bus menamas, simetriškas daiktui veidrodžio plokštumos atžvilgiu, tokio pat dydžio kaip daiktas, tik atvirkščias, t. y. dešinioji ir kairioji pusės atvaizde bus sukeistos vietomis. Daiktų veidrodinių paviršių mes nematome, matome tik tuose paviršiuose atsispindinčius kitų daiktų atvaizdus.

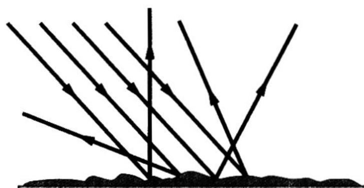


160 pav.

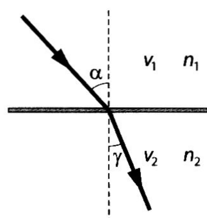


161 pav.

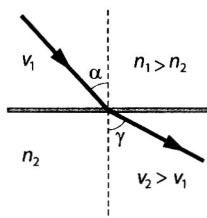
Kai paviršiaus nelygumai didesni už bangos ilgį, tai nuo šių paviršių atsispindinti šviesa išsklaidoma (162 pav.). Toks atspindys vadinamas **sklaidžiuoju** arba **difuziniu**, o paviršius – matiniu. Mes matome tuos kūnus, kurie patys šviečia arba difuziškai atspindi į juos krintančią šviesą.


162 pav.

Kai šviesa pereina iš vienos terpės į kitą, pakinta jos sklidimo kryptis, nes kinta šviesos sklidimo greitis. Anksčiau minėtas bangų lūžio dėsnis galioja ir šviesai: $\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n.$ Pastovus bet kokioms dviem skaidrioms terpėms būdingas dydis n vadinamas antrosios terpės santykiniu lūžio rodikliu pirmosios terpės atžvilgiu. Jo reikšmė lygi šviesos greičių pirmoje ir antroje terpėse santykiui. **Santykinis lūžio rodiklis** išreiškiamas absoliučiųjų lūžio rodiklių santykiu: $n = \frac{n_2}{n_1}$. **Absoliutusis lūžio rodiklis** –



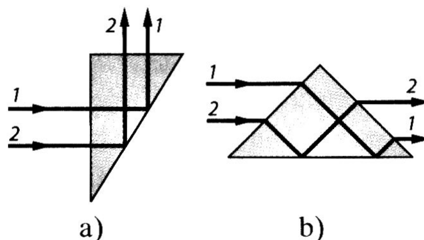
163 pav.



164 pav.

terpės optinį tankį (terpės savybę) išreiškiantis fizikinis dydis, kuris parodo, kiek kartų šviesos greitis vakuume yra didesnis už greitį terpėje: $n_1 = \frac{c}{v_1}$ ir $n_2 = \frac{c}{v_2}$. Terpė, kurioje šviesos sklidimo greitis mažesnis, vadinama optiškai tankesne. Šviesos greitis ore praktiškai toks pats kaip vakuume, todėl $n_{oro} \approx 1$. Kai šviesa pereina iš optiškai retesnės į tankesnę terpę, lūžęs spindulys artėja link statmens (163 pav.). Iš vakuumo pereidamas į kokią nors medžiagą šviesos spindulys visada lūžęs artėja link statmens. Tik kai $\alpha = 0°$, pereidamas terpių ribą šviesos spindulys nelūžta, tačiau sklidimo greitis vis tiek pakinta. Kai šviesa sklinda iš optiškai tankesnės terpės į retesnę, lūžęs jos spindulys tolsta nuo statmens (164 pav.). Esant tam tikram spindulio kritimo kampui α_0, lūžio kampas lygus 90°. Kai $\alpha > \alpha_0$, visa šviesa nuo aplinkų ribos atsispindi, todėl α_0 vadinamas ribiniu visiškojo atspindžio kampu. Toks atspindys vadinamas **visiškojo atspindžio reiškiniu**. Ribinį visiškojo atspindžio kampą galima rasti iš lūžio dėsnio:
$\frac{\sin\alpha_0}{\sin 90°} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$. Šiuo atveju $n_2 < n_1$ ir $n_{21} < 1$. Paprastai nurodomas optiškai tankesnės medžiagos santykinis lūžio rodiklis retesnės medžiagos atžvilgiu (šiuo atveju $n_{12} > 1$). Tada ribinis visiškojo atspindžio kampas randamas iš šios formulės: $\sin\alpha_0 = \frac{1}{n_{12}}$; čia n_{12} – terpės, kurioje sklido šviesa, santykinis lūžio rodiklis aplinkos atžvilgiu.

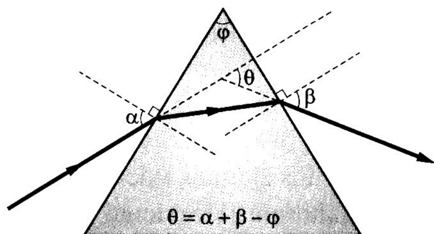
Visiškojo atspindžio reiškinys pritaikomas žiūrėjimo krypčiai pakeisti (165 pav., *a*) arba vaizdui apversti (165 pav., *b*).



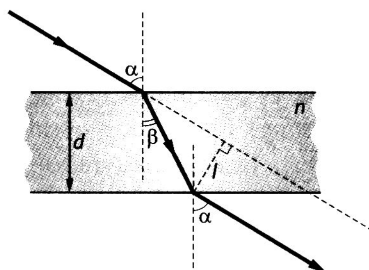
165 pav.

Vienspalvės (monochromatinės) šviesos spindulys, eidamas per trikampę prizmę (166 pav.), lūžta į pagrindo pusę, jei prizmė yra iš optiškai tankesnės medžiagos ($n > 1$) negu aplinka. Prizmės viršūnės kampas φ vadinamas laužiamuoju kampu, o θ – spindulio nuokrypio kampu. Jei prizmės n aplinkos atžvilgiu būtų mažesnis už vienetą, spindulys lūžtų priešingai.

Lygiagrečių sienelių plokštelę, kurios storis d, praėjęs spindulys išlieka lygiagretus, tik pasislinkęs atstumu l (167 pav.).

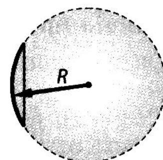


166 pav.

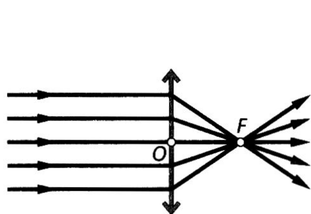


167 pav.

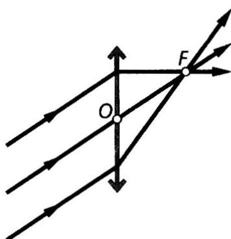
Daugelio optinių prietaisų pagrindinė dalis yra lęšis. **Lęšis** – tai skaidrus kūnas, apribotas dviem sferiniais paviršiais (vienas jų gali būti plokščias). Pagal formą lęšiai būna išgaubtieji ir įgaubtieji. Per lęšį einantis spindulys lūžta du kartus, jei krinta ne statmenai į jo paviršių. Lęšio paviršiaus kreivumas nusakomas kreivumo spinduliu R – sferos, kurios paviršiaus dalis (nuopjova) yra lęšio paviršius, spinduliu (žr. 168 pav.). Lęšiai, kurie spindulius glaudžia, vadinami **glaudžiamaisiais**, ir brėžiniuose žymimi ženklu. **Sklaidomųjų** lęšių sutartinis žymėjimo ženklas. Jei lęšio medžiaga optiškai tankesnė už supančią terpę ($n > 1$), tai išgaubti lęšiai yra glaudžiamieji, o įgaubti – sklaidomieji. Jei lęšio medžiagos $n < 1$ aplinkos atžvilgiu, atvirkščiai: išgaubtas – sklaidomasis, o įgaubtas – glaudžiamasis. Kai lęšio storis daug mažesnis už paviršių kreivumo spindulį ($d << R$), lęšis laikomas plonuoju. Vietoj pereinančio tokį lęšį spindulio dviejų lūžių vaizduojamas vienas bendras lūžis. Lęšio vidurys vadinamas jo **optiniu centru**.



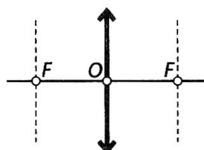
168 pav.



169 pav.

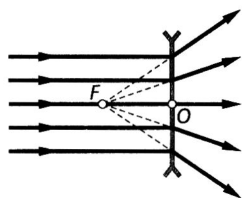


170 pav.

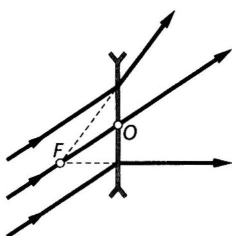


171 pav.

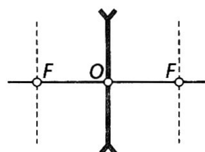
Tiesės, einančios per lęšio optinį centrą, vadinamos **optinėmis ašimis**. Ašis, einanti per paviršių kreivumo centrus O_1, O_2 ir lęšio optinį centrą O, vadinama pagrindine (175 pav.), o visos kitos – šalutinėmis (jų yra be galo daug). Lygiagretūs optinei ašiai spinduliai, perėję glaudžiamąjį lęšį, susikerta taške, kuris yra toje optinėje ašyje (169 pav.). Šis taškas vadinamas **lęšio židiniu**. Lęšis turi du pagrindinius židinius (vieną vienoje, kitą kitoje lęšio pusėje) ir be galo daug šalutinių (kiekvienai šalutinei ašiai po du) (170 pav., 173 pav.). Židiniai išsidėstę židinių plokštumose, kurios yra statmenos pagrindinei optinei ašiai (171 pav., 174 pav.).



172 pav.



173 pav.



174 pav.

Kadangi sklaidomasis lęšis spindulius laužia priešingai negu glaudžiamasis, tai iki lęšio buvę lygiagretūs spinduliai jį praėję nesikerta – kertasi jų tęsiniai (172 pav.). Akiai tik atrodo, kad spinduliai sklinda iš to taško, todėl sklaidomojo lęšio židiniai vadinami tariamaisiais arba menamaisiais.

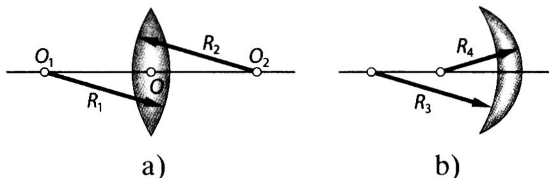
Kuo stipriau lęšis laužia spindulius, tuo jo židiniai yra arčiau lęšio. **Židinio nuotolis** yra viena iš lęšio charakteristikų ir žymima raide F. Dažnai naudojamas židinio nuotoliui atvirkščias dydis – **laužiamoji geba**: $D = \frac{1}{F}$. Ji matuojama dioptrijomis. Lęšio, kurio židinio nuotolis lygus vienam metrui, laužiamoji geba lygi vienai dioptrijai: $1\ \mathrm{D} = \frac{1}{\mathrm{m}} = 1\ \mathrm{m}^{-1}$.

Lęšio laužiamoji geba (židinio nuotolis) priklauso nuo lęšio medžiagos ir jo aplinkos bei paviršių kreivumo:

$$D = \frac{1}{F} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).$$

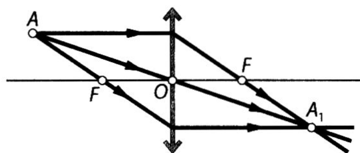
Glaudžiamojo lęšio D ir F yra teigiami: $D > 0$, $F > 0$, o sklaidomojo – neigiami: $D < 0$, $F < 0$.

Jei paviršių kreivumo spinduliai remiasi į paviršius iš lęšio vidaus, jie yra teigiami, o jei iš išorės – neigiami (175 pav., *a*, *b*): $R_1 > 0$, $R_2 > 0$, $R_4 > 0$, $R_3 < 0$.

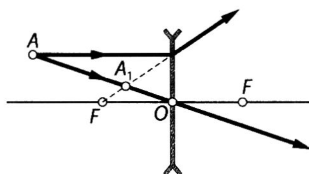


175 pav.

Kadangi lęšiai keičia spindulių sklidimo kryptis, per juos stebimų daiktų atvaizdai lyginant su pačiais daiktais gali būti labai įvairūs: padidinti, natūralaus dydžio, sumažinti, tikrieji arba menamieji, apversti arba neapversti. Norint brėžimo būdu surasti, kurioje vietoje susidaro per lęšį stebimo taško vaizdas, užtenka surasti iš taško sklindančių dviejų spindulių susikirtimo tašką. Tam yra trys „patogūs" spinduliai: 1) sklindantis optine ašimi (per optinį centrą), 2) sklindantis lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi ir 3) sklindantis per pagrindinį židinį (jei lęšis glaudžiamasis). Tolimesnis ploną glaudžiamąjį lęšį praėjusių spindulių sklidimas pavaizduotas brėžinyje (176 pav.). Jeigu praėję lęšį spinduliai susikerta – taško atvaizdas tikras, jei kertasi jų tęsiniai – menamas (177 pav.).

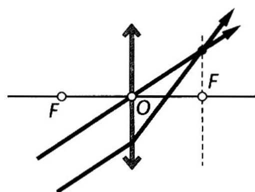


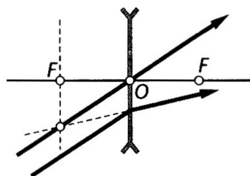
176 pav.



177 pav.

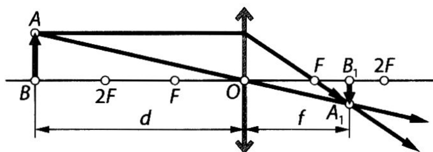
Kai taškas yra pagrindinėje optinėje ašyje, visi trys „patogūs" spinduliai sutampa. Tada, norėdami surasti bet kokio spindulio sklidimo kryptį, brėžiame su juo lygiagrečią šalutinę optinę ašį. Praėjęs spindulys



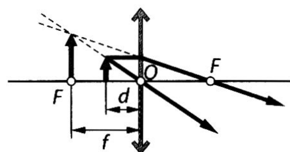


178 pav.

(arba jo tęsinys) eis per tai ašiai priklausantį šalutinį židinį (ašies ir židinio plokštumos susikirtimo tašką) (žr. 178 pav., *a*, *b*). Tuo atveju, kai daiktas *AB* yra toliau už dvigubą židinio nuotolį ($d > 2F$), glaudžiamuoju lęšiu gautas jo vaizdas A_1B_1 yra tikras, apverstas ir sumažintas (179 pav.). Čia *d* – daikto atstumas iki lęšio, *f* – vaizdo atstumas iki lęšio. Jeigu daiktas nutolęs nuo lęšio dvigubu židinio nuotoliu ($d = 2F$), tai jo vaizdas tikras, apverstas ir natūralaus dydžio. Jeigu daiktas yra tarp *F* ir *2F* ($F < d < 2F$), tai vaizdas tikras, apverstas ir padidintas. Židinyje esančio daikto vaizdas nesusidaro. Jei daiktas yra tarp lęšio ir židinio ($d < F$), jo vaizdas yra neapverstas, padidintas ir menamas (180 pav.). Kai daiktas yra labai toli nuo glaudžiamojo lęšio ($d = \infty$), jo be galo mažas atvaizdas susidaro priešingoje lęšio pusėje, židinyje. Daiktui artėjant prie lęšio iki *F*, atvaizdas tolsta ir didėja. Kai daiktas yra pačiame židinyje, jo atvaizdas būna be galo toli ir labai didelis. Jeigu daiktas truputį arčiau lęšio negu židinys, atvaizdas taip pat be galo toli ir labai didelis, tačiau jau kitoje pusėje, tik neapverstas ir menamas. Daiktui dar labiau artėjant prie lęšio, jo menamasis atvaizdas taip pat artėja ir vis mažiau didinamas.

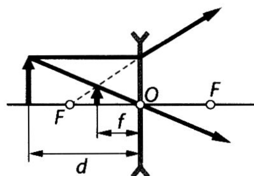


179 pav.

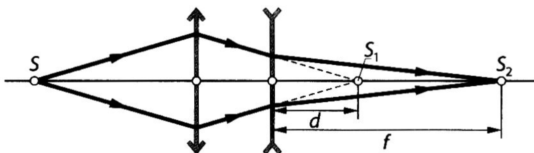


180 pav.

Sklaidomuoju lęšiu gautas daikto atvaizdas visada neapverstas, sumažintas, menamas ir visada yra toje pačioje pusėje (181 pav.). Kai daiktas labai toli nuo sklaidomojo lęšio ($d = \infty$), atvaizdas susidaro židinyje ($f = F$) ir yra labai mažas, taško dydžio. Daiktui artėjant prie lęšio, atvaizdas taip pat artėja link lęšio ir vis mažiau mažinamas.



181 pav.



182 pav.

Sąryšį tarp vaizdo ir daikto nuotolių nuo lęšio parodo lęšio formulė: $D = \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$. Šioje formulėje F (arba D) yra teigiamas ($F > 0$), jei lęšis glaudžiamasis, ir neigiamas ($F < 0$), jei lęšis sklaidomasis. Kai atvaizdas tikras, tai $f > 0$, jei menamas – $f < 0$. Daikto nuotolis $d > 0$, kai daiktas yra tikras. Būna, kad iš taško S išėję spinduliai patenka į lęšį netiesiogiai (žr. 182 pav.). Tokiu atveju, jiems perėjus per pirmąjį lęšį, šio sudarytas taško atvaizdas S_1 laikomas daiktu antrajam lęšiui. Jeigu iš taško išėję spinduliai į lęšį krinta susiglausdami, daiktas laikomas menamu ($d < 0$). Pavaizduotu atveju, taikant lęšio formulę antrajam lęšiui, $d < 0$, $F < 0$ (nes lęšis sklaidomasis), o $f > 0$, nes atvaizdas S_2 tikras.

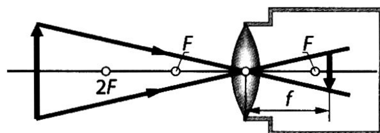
Plonųjų lęšių sistemos laužiamoji geba lygi visų lęšių laužiamųjų gebų sumai:

$$D = D_1 + D_2 + \dots .$$

Atvaizdo matmenų H ir daikto matmenų h santykis vadinamas **didinimu**: $\Gamma = \frac{H}{h}$. Galima įrodyti, kad $\frac{H}{h} = \frac{f}{d}$, todėl $\Gamma = \frac{f}{d}$. Didinimo formulėje f ir d visada teigiami. Lęšio didinimas priklauso nuo lęšio laužiamosios gebos ir daikto padėties lęšio atžvilgiu.

Lęšiai plačiai naudojami daugelyje optinių prietaisų, pirmiausia – **projekciniuose aparatuose**. Juos naudojant ekrane gaunamas įvairių objektų (skaidruolių, kino filmų juostos kadrų ir kt.) tikrasis padidintas vaizdas. Kadangi projektorių objektyvai vaizdą apverčia, projektuojamą objektą vaizdo atžvilgiu reikia įdėti aukštyn kojomis.

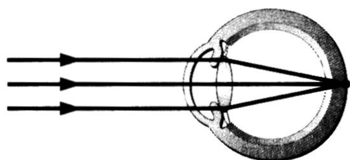
Kitas plačiai naudojamas prietaisas – **fotoaparatas** (183 pav.). Jis skirtas dominančio objekto vaizdui užfiksuoti nuotraukoje. Fotoaparatą sudaro kamera, objektyvas ir į kamerą



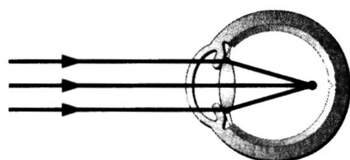
183 pav.

patenkančios šviesos kiekį reguliuojantis įrenginys. Objektyvu (lęšiu arba jų sistema) šviesai jautriame sluoksnyje (fotojuostoje ar kitur) gaunamas sumažintas, apverstas, tikras vaizdas. Kad fotojuostoje vaizdas būtų ryškus, objektyvas turi būti atstumu *f* nuo jos. Fotojuosta užfiksuoja fotografuojamo objekto vaizdą, kai ją paveikia pakankamas šviesos kiekis, kuris reguliuojamas keičiant diafragmą (angos skersmenį) ir išlaikymą (angos atidarymo trukmę).

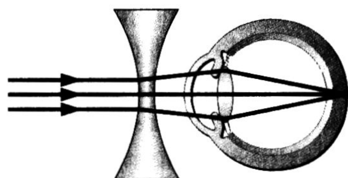
Savo paskirtimi analogiška fotoaparatui yra **akis**. Akyje stebimo objekto vaizdą fiksuoja akies obuolio dugne esanti tinklainė. Į akį patenkančios šviesos kiekį susitraukdamas arba išsiplėsdamas reguliuoja akies vyzdys. Nors tinklainėje vaizdas yra apverstas, tačiau nervų sistema prisitaikiusi suprasti jį kaip neapverstą. Kad stebint įvairiu nuotoliu esančius objektus vaizdas tinklainėje būtų ryškus, akis prisitaiko, keisdama lęšiuko židinio nuotolį. Akies gebėjimas keisti lęšiuko židinio nuotolį vadinamas **akomodacija**. Jei daiktas yra toli, jo atvaizdas tinklainėje susidaro be lęšiuką laikančių raumenų įtempimo. Artinant daiktą, akies raumenys, spausdami lęšiuką, didina jo paviršiaus kreivumą ir drauge keičia laužiamąją gebą. Normaliai akiai mažiausias atstumas, kai žiūrima be ypatingo raumenų įtempimo, yra apie 25 cm. Jis vadinamas geriausio matymo nuotoliu. Normalios akies (184 pav.) optinės sistemos (šviesą laužia ne tik lęšiukas) židinys yra ties tinklainėje esančia geltonąja dėmele (t. y. ten susikerta šviesos spinduliai). Tačiau kai kurių žmonių akyje spinduliai susikerta prieš tinklainę, todėl jie toli esančius daiktus mato neryškiai, geriausio matymo nuotolis jiems yra mažesnis nei 25 cm. Šis regėjimo defektas vadinamas **trumparegyste** (185 pav., *a*). Trumparegis, nešiodamas akinius su sklaidomaisiais lęšiais (185 pav., *b*), gali



184 pav.



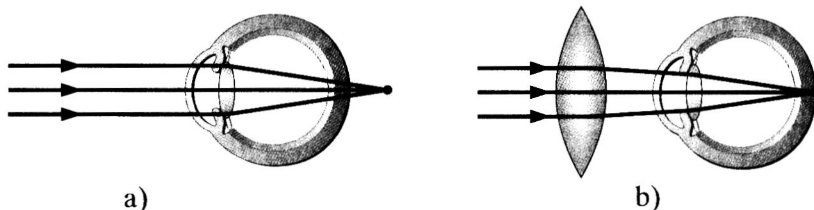
a)



b)

185 pav.

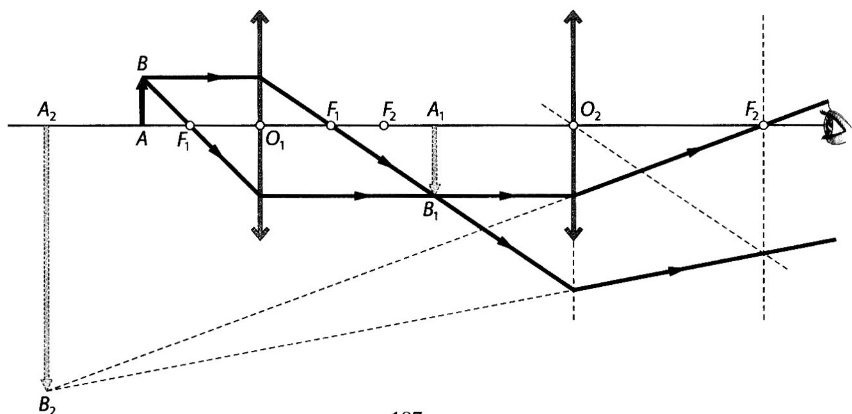
matyti tolimus daiktus kaip ir normalaus regėjimo žmogus. Jei spinduliai susikerta už tinklainės, žmogus – **toliaregis** (186 pav., *a*), kuriam geriausio matymo nuotolis didesnis nei 25 cm. Todėl toliaregis stengiasi tolinti artimus daiktus, kad geriau juos matytų. Šis regėjimo defektas taisomas akiniais su glaudžiamaisiais lęšiais (186 pav., *b*).



186 pav.

Kad du taškus akis suvoktų kaip atskirus, jų atvaizdai tinklainėje turi būti ant skirtingų nervinių galūnių. Taip būna, kai kūno regėjimo kampas ne mažesnis už vieną kampo minutę. Norėdami geriau įžiūrėti stebimo daikto detales, jį artiname, t. y. didiname regėjimo kampą, tačiau artinti daiktą galime tik iki geriausio matymo nuotolio. Jei ir šiuo nuotoliu žiūrint regėjimo kampas per mažas, daiktą stebime pro lupą. **Lupa** – trumpo židinio nuotolio glaudžiamasis lęšis. Stebėdami daiktą pro lupą, ją laikome prie akies, o tą daiktą – truputį arčiau nei lupos židinio nuotolis, t. y. kad susidarytų daikto menamasis neapverstas atvaizdas (180 pav.) geriausio matymo nuotoliu (d_0 = 25 cm) nuo lupos. Kadangi $d \approx F$, o $f = d_0$, tai lupos didinimas $\Gamma = \frac{d_0}{F}$. Įvairaus židinio nuotolio lupos didina nuo 2,5 iki 25 kartų.

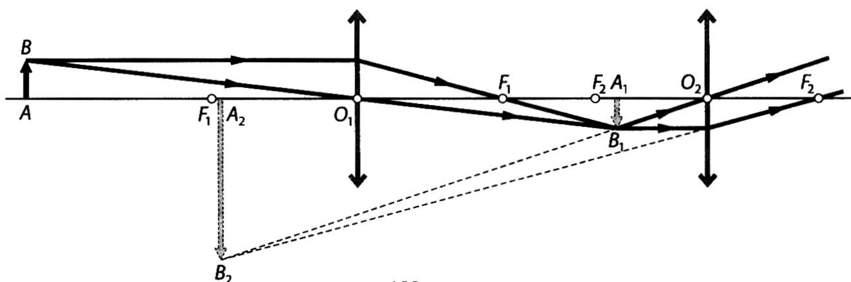
Labai mažų daiktų atvaizdams padidinti naudojamas mikroskopas. **Mikroskopas** – tai dviejų glaudžiamųjų lęšių – objektyvo ir okuliaro – sistema (187 pav.). Stebimas daiktas dedamas prieš objektyvą atstumu tarp F ir $2F$. Objektyvu gautas atvaizdas yra tikrasis, apverstas ir padidintas. Šis atvaizdas stebimas per lupą, t. y. okuliarą, kuris sukuria objektyvu gauto atvaizdo neapverstą, menamą ir padidintą atvaizdą geriausio matymo nuotoliu. Objektyvas ir okuliaras įtaisyti mikroskopo vamzdyje (tubuse) taip, kad keičiant jų tarpusavio atstumą būtų galima gauti ryškų atvaizdą. Mikroskopo didinimas lygus objektyvo ir okuliaro didinimų sandaugai: $\Gamma = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2$. Mikroskopo



187 pav.

didinimą galima išreikšti formule $\Gamma = \dfrac{d_0 l}{F_1 F_2}$; čia l – tubuso ilgis (atstumas tarp objektyvo ir okuliaro artimiausių židinių), F_1 ir F_2 – jų židinių nuotoliai, d_0 = 25 cm – geriausio matymo nuotolis. Dažniausiai mikroskopai didina nuo 50 iki 1000 kartų, bet sudėtingesni gali padidinti ir iki 3000 kartų.

Toli Visatoje esantiems objektams stebėti skirtas **teleskopas** (188 pav.). Jo sandara beveik analogiška mikroskopo sandarai, tik teleskopo objektyvo skersmuo ir židinio nuotolis daug kartų didesni už mikroskopo. Kadangi stebimo objekto $d >> 2F$, jo atvaizdas gaunamas praktiškai objektyvo židinyje, todėl teleskopo vamzdžio ilgis $l \approx F_1 + F_2$. Teleskopu stebimo atvaizdo matmenys visada daug kartų mažesni už objekto matmenis, todėl ankstesnis didinimo apibrėžimas netinka. Teleskopo didinimu laikome atvaizdo ir objekto regėjimo kampų santykį: $\Gamma = \dfrac{\beta}{\alpha}$. Galima įrodyti, kad teleskopo didinimas lygus

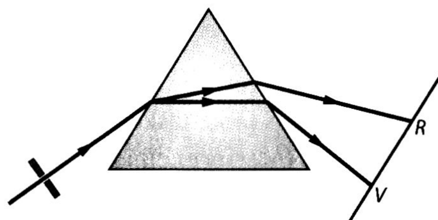


188 pav.

objektyvo ir okuliaro židinių nuotolių santykiui: $\Gamma = \frac{F_1}{F_2}$. Teleskopas ne tik priartina stebimo objekto atvaizdą, bet, surinkdamas į jį patenkančią šviesą, padidina jo ryškumą tiek kartų, kiek kartų objektyvo skerspjūvio plotas didesnis už akies vyzdžio plotą. Teleskopu ir mikroskopu stebimas atvaizdas yra apverstas.

Žemėje toli esantiems objektams stebėti yra skirtas **žiūronas** arba dviejų žiūronų sistema – **binoklis**. Kadangi žiūronas, kaip ir teleskopas, duoda apverstą atvaizdą, jame yra sistema, dar kartą tą atvaizdą apverčianti.

Pro siaurą plyšį, lygiagretų su prizmės šonine briauna, krentanti natūrali (balta) šviesa, pereidama stiklinę prizmę, išsisklaido į sudėtines dalis – skirtingų spalvų šviesas. Šis reiškinys vadinamas **dispersija** (189 pav.). Balta šviesa yra septynių spalvų – raudonos, oranžinės, geltonos, žalios, žydros, mėlynos ir violetinės – mišinys. Skirtingų spalvų šviesa – tai skirtingu dažniu kintantys elektromagnetiniai laukai. Visų spalvų šviesos sklidimo greitis vienodas tik tuštumoje (apytikriai ir ore). Pereinant šviesai į stiklą, sklidimo greitis sumažėja nevienodai: mažiausiai – raudonos, daugiausiai – violetinės. Todėl įvairių spalvų šviesa lūžta nevienodai ir apšviečia skirtingas ekrano vietas. Ekrane gauta spalvota juostelė vadinama **spektru**. Kietųjų kūnų, skysčių ir suslėgtų dujų skleidžiamos šviesos spektras yra ištisinis, praretintų, iš molekulių sudarytų dujų – juostinis, susidedantis iš spalvotų įvairaus pločio juostų, kurios atskirtos tamsiais tarpais. Atominių dujų, kurių atomai sąveikauja labai retai ir trumpai lyginant su laisvojo judėjimo trukme, skleidžiamos šviesos spektrą sudaro siauros spalvotos linijos. Linijinio spektro struktūra (linijų skaičius ir išsidėstymas), kiekvienai medžiagai yra savita, todėl iš linijinio spektro galima nustatyti šviesos spinduolio cheminę sudėtį. Jeigu praėjusi per nespinduliuojančias šviesos atomines dujas šviesa, kurios spektras ištisinis, išskaidoma į spektrą, jame atsiranda siauros tamsios linijos. Šios linijos sutampa su tų dujų spinduliavimo spektre esančiomis

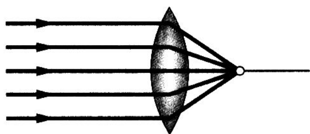


189 pav.

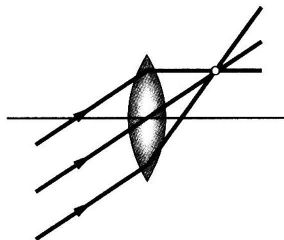
spalvotomis linijomis. Vadinasi, įkaitusios atominės dujos spinduliuoja, o atvėsusios sugeria tokių pačių bangų ilgių šviesą. Taigi pagal gavimo būdą spektrai skirstomi į spinduliavimo (emisijos) ir sugerties (absorbcijos). Kūno spalva priklauso nuo to, kokią šviesą difuziškai atspindi to kūno paviršius, todėl žalios spalvos kūnas atrodys žalias, apšviečiamas balta arba žalia šviesa. Apšviestas kitų spalvų šviesa, jis bus juodas.

Šviesos bangines savybes atskleidžia jai būdingi **interferencijos** ir **difrakcijos** reiškiniai. Sukurti du koherentines šviesos bangas skleidžiančius spinduolius neįmanoma. Koherentines bangas galima gauti tik to paties spinduolio šviesą išskaidžius į du pluoštus, kurie, nuėję nevienodą kelią, kristų į tą patį paviršių. Jei vyksta vienspalvės šviesos interferencijos reiškinys, interferenciniame vaizde matome šviesias tos spalvos juostas (*max* taškai) ir tamsias juostas (*min* taškai). Jeigu šviesa yra balta, interferenciniame vaizde matomos spalvotos juostos. Įvairiaspalvės šviesos bangų ilgiai nevienodi, todėl skiriasi ir *max* taškų vietos. Dėl šios priežasties įvairių skaidrių plėvelių (riebalų ir naftos produktų dėmių vandens paviršiuje, laumžirgio sparnų, perlamutro ir kt.) paviršiai, apšviesti balta šviesa, tampa spalvoti. Atkreipkite dėmesį, kad su bangos ilgiu tuštumoje turi būti lyginamas ne geometrinių, bet optinių kelių skirtumas. Optiniu keliu laikome terpės absoliučiojo lūžio rodiklio ir geometrinio kelio sandaugą. Pavyzdžiui, lygiagrečių su optine ašimi spindulių nueiti optiniai keliai iki židinio yra vienodi (190 pav., 191 pav.). Nors geometriniai keliai skiriasi, šie spinduliai tenkins maksimumo sąlygą, nes jų optinių kelių eigos skirtumas lygus nuliui. Šviesos sklidimas šiais keliais užtruks tiek pat laiko.

Interferencijos reiškinys pritaikomas praskaidrinant įvairių prietaisų objektyvus. Praskaidrinto objektyvo paviršius yra padengtas plė-

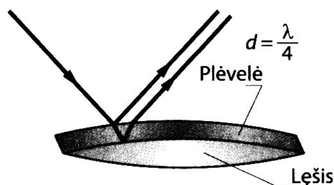


190 pav.



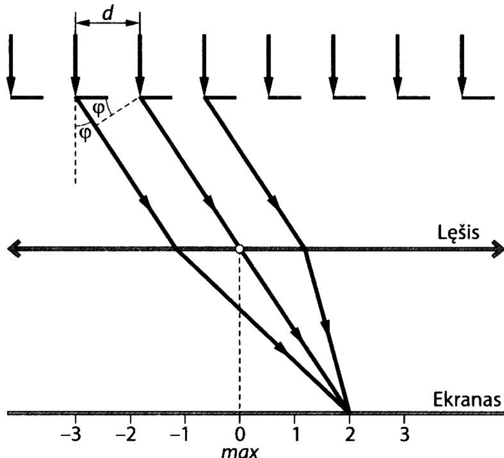
191 pav.

vele, kurios storis lygus $\frac{\lambda}{4}$ (192 pav.). Nuo plėvelės ir lęšio paviršiaus atsispindėję spinduliai tenkina minimumo sąlygą, vadinasi, nėra atsispindėjusios šviesos. Iš energijos tvermės dėsnio galima spręsti, kad dėl to padidėja praeinančios šviesos energija – lęšis tampa skaidresnis.



192 pav.

Praktinio šviesos difrakcijos pritaikymo pavyzdys – **difrakcijos gardelė**. Difrakcijos gardelės yra dviejų rūšių: praleidžiančios (skaidrios) ir atspindinčios šviesą (veidrodinės). Gaminant difrakcijos gardelę, labai plonu rėžikliu stiklo plokštelėje arba veidrodyje įrėžiami lygiagretūs rėžiai (193 pav.). Šie rėžiai neskaidrūs (matiniai), o tarpai tarp jų – skaidrūs arba veidrodiniai. Atstumas tarp rėžių (skaidraus plyšio ir rėžio bendras plotis) vadinamas **gardelės konstanta** d arba **periodu**. Aukštos kokybės gardelių kiekviename milimetre yra po tūkstantį ir daugiau rėžių. Statmenai gardelei krintanti šviesa, praėjusi per gardelės plyšius (tarpus tarp rėžių) arba atsispindėjusi nuo veidrodinių tarpų, dėl difrakcijos sklinda įvairiomis kryptimis. Prie pat gardelės padėtas lęšis surenka iki lęšio tarpusavyje lygiagrečiai einančius spindulius atitinkamuose ekrano taškuose (ekranas židinio plokštumoje). Už gardelės statmenai lęšiui sklindantys spinduliai, susirinkę ekrane, tenkina nulinio maksimumo sąlygą. Kampu φ nuo šios krypties nukrypusių pro gretimus plyšius praėjusių spindulių eigos skirtumas lygus $d \sin \varphi$. Jei $d \sin \varphi = k\lambda$, čia $k = 0; \pm 1; \pm 2; \ldots$, tai šiomis kryptimis sklidę spinduliai, surinkti ekrane, taip pat tenkins maksimumo sąlygą. Nulinis maksimumas yra toje pačioje vietoje visų spalvų šviesai. Aukštesnių eilių



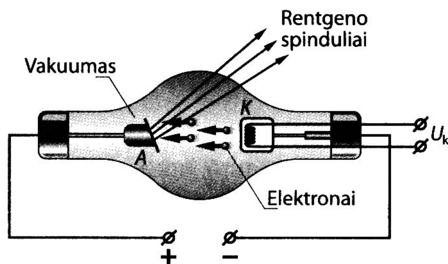
193 pav.

maksimumai skirtingų spalvų šviesai yra skirtingose vietose. Iš difrakcijos gardelės lygties $d \sin \varphi = k\lambda$ matyti, kad apšvietus gardelę balta šviesa arčiausiai nulinio maksimumo bus violetinės šviesos, o toliausiai – raudonos šviesos maksimumas. Kai gardelė apšviečiama balta šviesa, tai nulinis *max* bus baltas, o kituose matysime šviesos spektrą. Jei nagrinėjamų spindulių nuokrypis φ mažas (keli laipsniai), tai $\sin\varphi \approx tg\varphi = \frac{h}{D}$; čia h – aukštesnės eilės *max* nuotolis nuo nulinio *max* ekrane, D – gardelės nuotolis nuo ekrano.

Šviesai būdingas **poliarizacijos** reiškinys įrodo, kad šviesa – tai skersinės bangos. Šviesą poliarizuoja Islandijos špato, turmalino, herapatito kristalai bei daugelis kitų medžiagų. Šviesa visiškai poliarizuojasi, kai nuo dvi terpes skiriančios ribos dalis šviesos atsispindi, o dalis pereina į antrąją terpę, jeigu atsispindėjęs ir lūžęs spinduliai yra vienas kitam statmeni. Poliarizacijos reiškinys pritaikomas mokslinių tyrimų ir techniniuose prietaisuose.

Ultravioletiniai spinduliai. Elektromagnetinių bangų skalėje šalia matomos šviesos spektro violetinio krašto yra ultravioletiniai spinduliai. Šių spindulių diapazonas, lyginant su šviesos diapazonu, labai platus: nuo 400 nm iki 10 nm. Ultravioletiniams spinduliams būdingas biologinis ir cheminis poveikis. Mažos šių spindulių dozės žmogaus ir gyvūno organizmą veikia palankiai – didina atsparumą infekcijoms, skatina vitamino D gamybą, gydo rachitą, žaizdas. Tačiau jie ardo akies tinklainę, dideli kiekiai gali sukelti odos vėžį. Ultravioletiniai spinduliai užmuša ligas sukeliančias bakterijas, todėl jais švitinamos ligoninių operacinės. Natūralus ultravioletinių spindulių šaltinis yra Saulė, dirbtinis – kvarco lempa, elektros lankas. Daugelis šviesai skaidrių medžiagų nepraleidžia arba blogai praleidžia ultravioletinius spindulius. Nuo žalingo jų poveikio apsaugo atmosfera, tačiau nykstant ozono sluoksniui spindulių poveikis didėja. Ultravioletinius spindulius gerai sulaiko stiklas. Šiems spinduliams laidus tik kvarcinis stiklas.

Rentgeno spinduliai. Pačioje XIX amžiaus pabaigoje (1895 m.) vokiečių fizikas Vilhelmas Rentgenas nustatė, kad greitiems elektronams susiduriant su kieta medžiaga sukeliamas spinduliavimas, kuris prasiskverbia pro šviesai neskaidrias medžiagas. Šiuos spindulius jis pavadino X spinduliais, kurie vėliau mokslininko garbei buvo pava-



194 pav.

dinti rentgeno spinduliais. Rentgeno spinduliai – tai dar trumpesnės už ultravioletinius spindulius elektromagnetinės bangos. Jų diapazonas elektromagnetinių bangų skalėje – nuo 10 nm iki 1 pm. Rentgeno spinduliai gaunami rentgeno vamzdžiu (194 pav.). Jį sudaro stiklinis indas, iš kurio išsiurbtas oras. Inde įtaisyti du elektrodai – anodas ir katodas. Įkaitintas katodas spinduliuoja elektronus, kurie aukštos įtampos elektrinio lauko tarp anodo ir katodo pagreitinti įgyja didelę kinetinę energiją. Kuo didesniu greičiu elektronai smogia į anodą, tuo trumpesnio bangos ilgio rentgeno spindulius jie stabdomi spinduliuoja. Rentgeno spinduliai smarkiai ardo organizmo ląsteles. Dėl šios savybės medicinoje jie naudojami piktybinių auglių ląstelėms naikinti. Kadangi įvairios medžiagos skirtingai praleidžia rentgeno spindulius, šie spinduliai naudojami medicininei diagnostikai (daromos rentgeno nuotraukos). Technikoje darant metalinių detalių rentgeno nuotraukas surandami defektai: įtrūkimai, priemaišos, tuštumos. Labai mažo bangos ilgio rentgeno spinduliais peršviečiant kristalus tiriama jų vidinė struktūra.

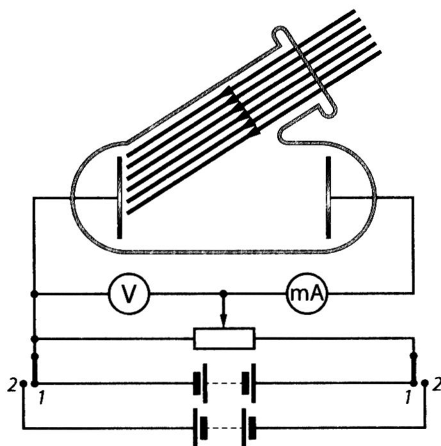
Gama spinduliai. Tai pačios trumpiausios elektromagnetinės bangos. Gama spinduliai biologiškai ir chemiškai dar aktyvesni už rentgeno spindulius, todėl jų poveikis gyvam organizmui labai pavojingas. Šiuos spindulius sulaiko tik storas švino sluoksnis ar kelių metrų storio betonas. Gama spindulių šaltinis yra radioaktyviosios medžiagos. Jie naudojami medicinoje bei kristalų struktūrai tirti.

V. MODERNIOJI FIZIKA

1. Kvantinė fizika

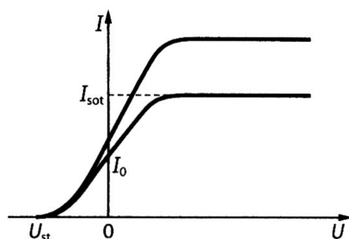
Yra šviesai būdingų reiškinių, kurių dėsningumų negalima paaiškinti remiantis banginėmis savybėmis. Vienas tokių reiškinių yra **fotoefektas**, kurio metu šviesa iš medžiagos išlaisvina elektronus. Pirmasis šį reiškinį aptiko Heinrichas Hercas, o jam būdingus dėsningumus nustatė Aleksandras Stoletovas. Fotoefektą galima stebėti panaudojant elektrometrą ir prie jo pritvirtintą cinko plokštelę. Plokštelė įelektrinama ir apšviečiama elektros lanko šviesa. Nustatyta, kad teigiamai įelektrintos plokštelės išsielektrinimui apšvietimas įtakos neturi, o neigiamai įelektrinta plokštelė apšviečiama greitai išsielektrina. Šiuos reiškinius galima paaiškinti tuo, kad šviesa išplėšia elektronus iš cinko plokštelės paviršiaus. Neigiamai įelektrinta plokštelė juos atstumia, todėl išsielektrina; įelektrinta teigiamai sugrąžina elektronus atgal, todėl jos krūvis nekinta.

Fotoefekto dėsningumams tirti į elektros grandinę įjungiamas uždaras indas, iš kurio išsiurbtas oras, su dviem elektrodais (195 pav.). Inde yra kvarco langelis, praleidžiantis ne tik šviesą, bet ir ultravioletinius spindulius. Kai prie apšviesto elektrodo prijungtas neigiamas baterijos polius, o prie neapšviesto – teigiamas (jungikliai *1* padėtyje), miliampermetras rodo, kad grandine srovė (I_0) teka netgi tada, kai potenciometro šliaužiklis yra kairėje kraštinėje padėtyje (tuomet įtampa tarp elektrodų lygi nuliui). Šliaužiklį stumiant į dešinę (didinant įtampą tarp elektrodų), srovė iš pradžių stiprėja, o paskui tampa pastovi. Srovė teka tol,



195 pav.

kol katodą veikia šviesa (ji išlaisvina elektronus). Dažnai šviesos išlaisvinti elektronai vadinami fotoelektronais, o jų sudaroma srovė – **fotosrove**. Fotosrovė, kurios stipris kintant įtampai tarp elektrodų išlieka pastovus, vadinama **soties srove** (žr. 196 pav.). Bandymais nustatyta, kad kuo stipresne šviesa apšviečiamas katodas, tuo didesnis soties srovės stipris. Kodėl teka fotosrovė, kai įtampos tarp elektrodų nėra, ir kodėl jai didėjant iš pradžių fotosrovė stiprėja, o paskui virsta soties srove? Tą galima paaiškinti šitaip. Šviesa ne tik išlaisvina elektronus, bet ir suteikia jiems greitį. Netekęs elektronų neutralus elektrodas virsta teigiamu, todėl dauguma fotoelektronų sugrįžta atgal; tačiau patys greičiausi elektronai nulekia iki kito elektrodo ir sugrįžta atgal grandine. Kai apšviestas elektrodas didinant įtampą virsta neigiamu, o neapšviestas – teigiamu, išlaisvinti fotoelektronai verčiami judėti link anodo. Kuo didesnė įtampa, tuo didesnė fotoelektronų dalis sudaro fotosrovę ir tuo mažiau jų grįžta atgal į katodą. Esant tam tikrai įtampai, visi išlaisvinti elektronai sudaro srovę. Įtampai padidėjus kiekvienas iš jų lekia dar greičiau, vis dėlto bendras atlekiančių per sekundę elektronų skaičius lieka toks pat. Tyrinėjant soties srovės stiprio priklausomybę nuo šviesos stiprio buvo nustatyta, kad **soties srovės stipris (per sekundę išlaisvinamų elektronų skaičius) tiesiogiai proporcingas apšviečiančios šviesos stipriui.** Tai **I fotoefekto dėsnis.**



196 pav.

Jei potenciometro šliaužikliui esant kairėje jungiklius perjungtume į *2* padėtį ir didintume įtampą, fotoelektronai būtų stabdomi, ir fotosrovė silpnėtų. Esant tam tikrai įtampai, bus sustabdyti patys greičiausi fotoelektronai, ir fotosrovė nutrūks. Ši įtampa vadinama **stabdymo įtampa** (U_{st}). Iš jos galima spręsti apie didžiausią fotoelektronams šviesos suteikiamą greitį, nes elektrinio lauko atliktas darbas stabdant elektronus lygus jų turėtai kinetinei energijai: $A = E_{k\,max}$ arba $eU_S = \frac{mv^2}{2}$. **Bandymais nustatyta, kad stabdymo įtampa (didžiausias išlaisvintų elektronų greitis) priklauso nuo apšviečiančios šviesos spalvos (dažnio) ir elektrodo medžiagos, bet nepriklauso nuo šviesos stiprio.** Tai **II fotoefekto dėsnis.**

Nė vieno iš šių dėsningumų nepavyko paaiškinti banginėmis šviesos savybėmis. Teoriją, paaiškinančią fotoefekto dėsningumus, sukūrė Albertas Einšteinas. Jis pasinaudojo Makso Planko idėja, kad šviesa išspinduliuojama ir sugeriama porcijomis. Kiekviena elektromagnetinio lauko porcija išlaiko individualumą. Pagrindinė jos charakteristika – energija – siejama su šviesos spalva (elektromagnetinio lauko kitimo dažniu). $E = hf$; čia $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J · s – Planko konstanta.

Elektromagnetinio lauko porcija vadinama **fotonu** arba **kvantu**. Einšteinas teigė, kad išlaisvinančio fotoelektronus fotono energija sunaudojama išlaisvinimo darbui atlikti ir elektrono kinetinei energijai padidinti: $hf = A + \frac{mv^2}{2}$. **Einšteino lygtis** – energijos tvermės dėsnis fotoefektui. Iš jos išplaukia, kad v_{max} priklauso tik nuo f ir A.

Elektrono išlaisvinimo darbą A sąlygoja metalo rūšis. Kiekvienam metalui būdingas minimalus dažnis f_{min} arba maksimalus bangos ilgis λ_{max} – raudonoji (ilgabangė) fotoefekto riba. $hf_{min} = A$. Jeigu kiekvieno fotono energija mažesnė už išlaisvinimo darbą, fotoefektas nevyksta. Kuo stipresnė šviesa, tuo daugiau joje fotonų, bet kiekvienas jų išlaiko individualumą. Du fotonai negali išlaisvinti vieno elektrono. Fotoefekto riba vadinama ilgabange arba raudonąja, nes elektromagnetinių bangų skalėje ji randama einant bangos ilgio didėjimo kryptimi raudonos šviesos link.

Kadangi fotonas išlaiko individualumą, jis priskiriamas dalelėms. Tačiau tai nėra paprasta dalelė, kaip daugelis kitų. Visų pirma fotonas nėra medžiagos dalelė. Be to, atsiradęs fotonas juda tam tikru greičiu (tuštumoje c, medžiagoje – $v = \frac{c}{n}$). Fotonas neegzistuoja nejudėdamas. Remiantis esančiu masės ir energijos sąryšiu $E = mc^2$, fotonas apibūdinamas reliatyvistine mase $m = \frac{hf}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$ bei judesio kiekiu $p = mc = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

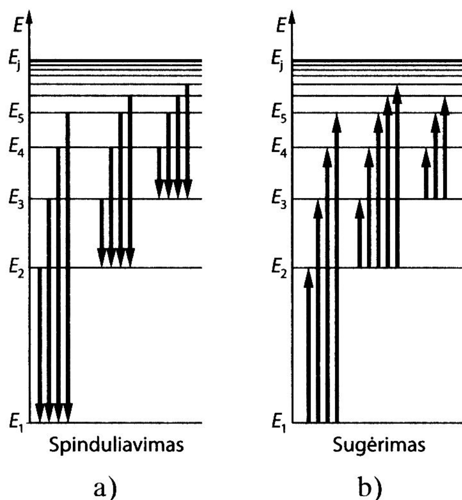
Kvantines elektromagnetinio lauko savybes atskleidžia ne tik fotoefekto reiškinys, bet ir biologinis bei cheminis lauko veikimas. Nagrinėdami elektromagnetinių bangų skalę minėjome, kad įvairių spindulių aktyvumas didėja didėjant jų dažniui, t. y. fotonų energijai.

2. ATOMO FIZIKA

Nors žodis „atomas“ reiškia „nedalomas“, tačiau kūnų įelektrinimo reiškiniai, šviesos savybės, jos spinduliavimo ir sugėrimo dėsningumai privertė suabejoti šiuo teiginiu. Buvo siūlomi įvairūs modeliai jų sandarai paaiškinti. Paprasčiausias – mechaninis atomo modelis. Pagal jį atomas – teigiamai įelektrintas rutuliukas, kuriame yra elektronai. Toks modelis tiko paaiškinti įelektrinimo reiškiniams, tačiau Ernestas Rezerfordas, tyrinėdamas, kaip per ploną aukso foliją praeina teigiamai įelektrintos dalelės (α dalelės), nustatė, kad atomo teigiama dalis yra apie šimtą tūkstančių kartų mažesnė už patį atomą. O šios teigiamos dalies masė beveik lygi atomo masei. Remdamasis Rezerfordo bandymais, Nilsas Boras pasiūlė **atomo modelį**, savo sandara primenantį Saulės sistemą. Jame elektronai skrieja aplink atomo branduolį, panašiai kaip planetos aplink Saulę. Šis atomo modelis vadinamas planetiniu. Pagal planetinį atomo modelį, atomą sudaro jo branduolys ir elektronų apvalkalas, tačiau pagal elektrodinamikos dėsnius su pagreičiu judantis kūnas (apskritimu skriejantis elektronas) turi spinduliuoti elektromagnetines bangas. Dėl to atomo energija turi mažėti, ir per labai trumpą laiką (maždaug 10^{-8} s) elektronas turėtų nukristi ant branduolio. Tada atomas nustotų egzistuoti. Iš tikrųjų nieko panašaus neįvyksta. Atomai yra stabilūs ir gali egzistuoti neribotą laiką. Išeitį iš susidariusios keblios situacijos Boras rado, suformuluodamas du postulatus.

Pirmasis postulatas: atominė sistema (branduolys ir elektronai) gali būti tik tam tikrų stacionarių būsenų. Stacionarios būsenos atomai nespinduliuoja energijos. Skirtingų būsenų atomo energijos nevienodos. Mažiausios energijos būsena vadinama pagrindine, o didesnių energijų – sužadintomis. Šis postulatas prieštarauja klasikinei mechanikai, kurios teigimu judančių elektronų energija gali būti bet kokia. Jis prieštarauja ir klasikinei elektrodinamikai, nes tvirtina, kad elektronai, judėdami su pagreičiu, gali nespinduliuoti elektromagnetinio lauko.

Antrasis postulatas: pereidamas iš vienos stacionarios būsenos į kitą atomas išspinduliuoja arba sugeria elektromagnetinio lauko kvantą (fotoną). Pagrindinė fotono charakteristika – energija – lygi atomo energijos pokyčio moduliui: $E_{kn} = hf_{kn} = |E_k - E_n|$. Čia k ir n –



197 pav.

pradinės ir galinės būsenų numeriai. Kai $k > n$ ($E_k > E_n$), atomas išspinduliuoja fotoną, o kai $k < n$ ($E_k < E_n$) – absorbuoja (sugeria).

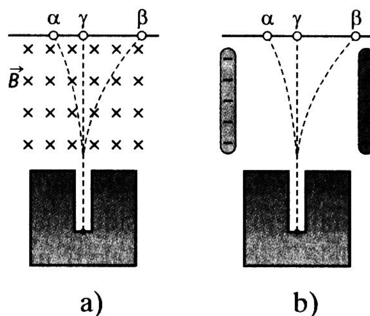
Nepamirškite, kad planetinis atomo modelis tėra vienas iš daugelio, turintis nemažai trūkumų. Iš tikrųjų elektronų judėjimas jame mažai panašus į planetų judėjimą orbitomis, tačiau šis modelis patogus savo vaizdumu, leidžia paprastai paaiškinti linijinių spektrų kilmę.

Atidėtoje galimų atomo energijų skalėje E_1, E_2, E_3, ..., E_n yra stacionarių būsenų atomo 1, 2, 3, ..., n energijų reikšmės (197 pav., *a*, *b*). Galimų būsenų yra labai daug. Kuo aukštesnės energetinės būsenos yra atomas, tuo mažiau skiriasi gretimų būsenų energijos. E_j – atomo jonizacijos energija. Ji reikalinga pagrindinės būsenos (E_1) atomui jonizuoti. Kadangi atomų energijų pakitimų yra begalės, tai atominių dujų skleidžiamos šviesos spektre matyti daug apibrėžto bangos ilgio spektrinių linijų. Kiekviena spektrinė linija atitinka kažkurių atomų perėjimą iš vienos būsenos į kitą. Absorbcijos spektre esančios linijos reiškia, kad atitinkamų energijų fotonai, priversdami atomus pereiti iš žemesnių būsenų į aukštesnes, buvo absorbuoti.

3. BRANDUOLIO FIZIKA

Be elektronų, skriejančių apie branduolį, atome yra **protonai** ir **neutronai**. Šios dalelės sudaro atomo branduolį. Protonai ir neutronai bendrai vadinami **nukleonais**. Protonų skaičių branduolyje ir elektronų, skriejančių apie branduolį, skaičių nusako atomo eilės numeris periodinėje elementų lentelėje – Z. Skaičius Z yra ir branduolio krūvis, išreiškiamas elementariaisiais krūviais. Protono ir neutrono masės apytikriai vienodos ir lygios 1 u ($m_p = 1{,}00728$ u, $m_n = 1{,}00866$ u). Elektrono masė apie 1800 kartų mažesnė ($m_e =$ $= 0{,}00055$ u). Todėl atomo ir jo branduolio masės praktiškai sutampa

ir gali būti išreiškiamos sveiku skaičiumi – **atominiais masės vienetais** (1 u = 1,66 · 10^{-27} kg). Šis skaičius vadinamas atomo masės skaičiumi *M*. Jis parodo ne tik atomo (jo branduolio) masę u vienetais, bet kartu ir nukleonų skaičių branduolyje. Egzistuoja medžiagos, kurių atomų branduoliuose yra vienodas skaičius protonų, bet skirtingas – neutronų. Kadangi branduolio krūvis (protonų skaičius) lemia medžiagos chemines savybes, šios fiziškai skirtingos medžiagos žymimos tuo pačiu cheminiu simboliu (yra toje pačioje periodinės lentelės vietoje). Turinčios tokį patį protonų, bet skirtingą neutronų skaičių (besiskiriančios masės skaičiumi) cheminės medžiagos vadinamos **izotopais**. Tos pačios medžiagos izotopų vienodos cheminės, bet skirtingos fizinės savybės. Reiškiniai, kurių metu kinta atomų branduoliai, vadinami **branduolinėmis reakcijomis**. Gamtoje yra medžiagų, kurių branduoliai nėra stabilūs, virsta kitais. Šis reiškinys vadinamas **radioaktyvumu**, o pačios medžiagos – radioaktyviomis. Radioaktyviųjų virsmų metu šios medžiagos spinduliuoja 3 rūšių spindulius: α, β, γ. Šie spinduliai taip pat vadinami radioaktyviaisiais. Radioaktyvieji spinduliai veikia fotografinę plokštelę. Kad jie yra trijų rūšių, nustatyta atliekant bandymus. Statmename sklidimo krypčiai magnetiniame (198 pav., *a*) arba elektriniame (198 pav., *b*) lauke spindulių pluoštas pasidalijo į 3 dalis. Daugiausiai nukrypstantis pluoštas buvo pavadintas β. Į priešingą pusę ir mažiau nukrypstantis – α. Spinduliai, kuriems magnetinis arba elektrinis laukas neturėjo poveikio, pavadinti γ. Ištyrinėjus spindulių savybes paaiškėjo, kad γ spinduliai yra labai trumpos (trumpesnio bangos ilgio už rentgeno spindulius) elektromagnetinės bangos. Tai milžiniškos energijos fotonai, sukeliantys stiprų cheminį ir biologinį poveikį. Nuo jų apsaugo tik kelių centimetrų švino sluoksnis arba kelių metrų storio betono sienos. α spinduliai – teigiamai elektringos dalelės, kurių krūvis lygus 3,2 · 10^{-19} C, t. y. 2 elementariems krūviams, o masė – 4 atominiams masės vienetams. α dalelės – tai helio atomų branduoliai, todėl jos žymimos



198 pav.

simboliu ^4_2He. α spinduliai yra mažiausiai skvarbūs iš visų radioaktyviųjų spindulių. Juos sulaiko 0,1 mm popieriaus lapas arba keliasdešimties centimetrų oro sluoksnis. Žmogų nuo jų apsaugo drabužiai, tačiau jei organizmo viduje įkvėpta arba su maistu patekusi radioaktyvioji medžiaga išspinduliuoja α dalelę, ji gali jonizuoti kūno audinių atomus. β spinduliai – greičiu, artimu šviesos greičiui, judantys elektronai. Turėdami didelę energiją, jie taip pat gali jonizuoti atomus, ardyti molekules. β spinduliai skvarbesni už α spindulius. Juos sulaiko kelių milimetrų storio aliuminio plokštelė, pastatų sienos.

Radioaktyviojo spinduliavimo metu branduolių virsmai vyksta pagal vadinamąsias **poslinkio taisykles**. Spinduliuojančios α daleles medžiagos atomų branduolių krūvis sumažėja dviem elementariais teigiamais krūviais, o masė – 4 atominiais masės vienetais. Dėl to radioaktyvioji medžiaga virsta kita chemine medžiaga, kuri periodinėje elementų lentelėje yra pasislinkusi per 2 langelius į sistemos pradžią. Simboliais šią taisyklę galima užrašyti taip: $^M_ZX \rightarrow ^{M-4}_{Z-2}Y + ^4_2He$; čia X – virtusio, Y – susidariusio cheminio elemento simboliai. Indeksai viršuje ir apačioje turi keletą prasmių. Viršuje – branduolio masės skaičius ir nukleonų skaičius jame. Apačioje – branduolio krūvis elementariaisiais krūvio vienetais, elemento eilės numeris bei protonų skaičius branduolyje.

β spinduliavimo metu iš branduolio išlekia elektronas. Dėl to branduolio krūvis padidėja 1 elementariuoju krūvio vienetu, o masė beveik nepakinta. Po β skilimo radioaktyvioji medžiaga virsta kita chemine medžiaga (cheminis elementas – nauju elementu), kuri pasislenka per 1 langelį į sistemos pabaigą. Simboliais poslinkio taisyklė β spinduliavimui užrašoma taip: $^M_ZX \rightarrow ^M_{Z+1}Y + ^0_{-1}e$. Iš pirmo žvilgsnio šie abu virsmai analogiški, tačiau taip nėra. α skilimo metu nuo branduolio atsiskiria jo dalis – 4 nukleonai (2 protonai ir 2 neutronai). Priešingai, β skilimo metu išlekia elektronas, kurio nebuvo branduolyje. Vykstant šiam skilimui, vienas neutronas virto protonu ir elektronu, nes nukleonų skaičius liko nepakitęs, o protonų vienu padaugėjo. Nors susidaro įspūdis, kad neutronas nėra elementarioji dalelė, tačiau taip sakyti negalima – jis nėra sudarytas iš protono ir elektrono. Mikropasauliui būdingi reiškiniai, kurių metu vienos elementariosios dalelės virsta kitomis. Pavyzdžiui, protonas gali virsti

neutronu ir pozitronu. Pozitronas – elektrono masės ir krūvio (tik teigiamo) dalelė. Jis laikomas elektrono antidalele.

γ spinduliavimo metu branduolio krūvis nekinta, o masė sumažėja labai nežymiai.

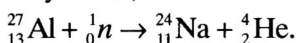
Tiriant radioaktyviųjų medžiagų virsmus nustatyta, kad ilgainiui šių medžiagų aktyvumas tolydžio mažėja. Kiekvienai medžiagai būdingas laiko tarpas, per kurį jos spinduliavimo aktyvumas sumažėja perpus. Šis fizikinis dydis vadinamas **pusėjimo trukme** arba **puskiekio periodu** ir žymimas T. Spinduliavimo aktyvumo sumažėjimą galima paaiškinti tuo, kad per šį laiko tarpą pusė medžiagos branduolių virto kitais. Įvedus pusėjimo trukmę, galima užrašyti **radioaktyviojo skilimo dėsnį:**

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}};$$

čia N_0 – nesuskilusių radioaktyviųjų atomų skaičius stebėjimo pradžioje, N – jų skaičius, praėjus laikotarpiui t. Šis dėsnis yra statistinis. Jis galioja tik esant pakankamai dideliam atomų skaičiui. Nustatyti bet kurio atomo branduolio skilimo momentą neįmanoma. Atomai nesensta. Tikimybė virsti kitu visiškai vienoda ir seniai egzistuojančiam atomui, ir ką tik susidariusiam iš kitos radioaktyviosios medžiagos. Bet kuris radioaktyvus atomas kiekvieną akimirką spontaniškai gali virsti kitu (per puskiekio periodą vidutiniškai pusė). Kuo mažesnis preparato atomų skaičius, tuo galimi didesni nukrypimai nuo šio vidurkio.

Vienos kitomis medžiagos virsta natūraliai, spontaniškai, tačiau šį virsmą pasisekė sukelti ir dirbtiniu būdu. Apšaudant azotą didelės energijos α dalelėmis, sukelta tokia branduolinė reakcija: ${}^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \rightarrow$ $\rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H$. Apšaudant ličio branduolius greitaisiais protonais, gautos dvi α dalelės: ${}^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He$. Taip pat, apšaudant α dalelėmis berilio atomus, buvo atrasti neutronai: ${}^{9}_{4}Be + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n$.

Neutronai ypatingi tuo, kad jie be pasipriešinimo gali prasiskverbti į atomų branduolius (kadangi yra neutralūs) ir sukelti jų virsmus. Priešingai, α dalelėms arba protonams reikia suteikti dideles kinetines energijas, kad šios dalelės nugalėtų branduolių stūmą ir priartėtų iki jų. Pavyzdžiui, neutronais apšvitinant aliuminį, įvyksta tokia reakcija:



${}^{27}_{13}Al + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{24}_{11}Na + {}^{4}_{2}He$.

Pastebėta, kad lėtieji neutronai paprastai kur kas efektyvesni už greituosius. Dažniausiai jie sulėtinami paprastame vandenyje. Susidurdami su vandenilio branduoliais (protonais), neutronai perduoda jiems kinetinę energiją efektyviausiai, kadangi jų masės beveik lygios.

Neutronai gali sukelti kai kurių sunkiųjų elementų branduolių dalijimąsi. 1938 m. buvo nustatyta, kad apšaudant uraną neutronais atsiranda nauji cheminiai elementai, priklausantys periodinės elementų lentelės viduriniajai daliai. Branduolys ne tik pasidalija į dvi skeveldras (du naujus branduolius), bet kartu ir išspinduliuoja 2–3 neutronus bei γ kvantus. Pavyzdžiui: ${}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{95}_{36}\mathrm{Kr} + {}^{139}_{56}\mathrm{Ba} + 2{}^{1}_{0}n$ arba ${}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{144}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{90}_{38}\mathrm{Sr} + 2{}^{1}_{0}n$. Dalijimosi metu atsiradę neutronai gali sukelti kitų branduolių dalijimąsi, kurio metu išspinduliuoti neutronai vėl sukels dalijimąsi. Tokia nenutrūkstama branduolių dalijimosi reakcija vadinama **grandinine**. Iš visų gamtoje egzistuojančių cheminių elementų grandininei reakcijai tinka tik urano ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ ir plutonio ${}^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ izotopų branduoliai.

Kalbėdami apie branduolių sandarą, turime atsakyti į klausimą: kodėl branduolį sudarantys nukleonai laikosi vienoje sankaupoje? Iki šiol žinojome dviejų rūšių sąveiką: gravitacijos ir elektrinę. Nukleonų gravitacija labai silpna (per mažos jų masės). Neutronai neįelektrinti, todėl elektrine sąveika nesąveikauja, o protonai, kaip teigiami, stumia vienas kitą. Vadinasi, egzistuoja trečios rūšies sąveika. Ji vadinama **branduoline** arba **stipriąja**. Ši sąveika pasireiškia tada, kai atstumai tarp nukleonų labai maži – iki $2 \cdot 10^{-15}$ m. Tuomet stipriõsios sąveikos jėgos apie 100 kartų viršija protonų elektrinės stūmos jėgas. Didėjant atstumui, branduolinė sąveika staigiai silpnėja ir išnyksta, kai jis didesnis už $3 \cdot 10^{-15}$ m. Jeigu nukleonai suartėja iki $0{,}5 \cdot 10^{-15}$ m, branduolinė trauka virsta stūma. Taigi nukleonai, sąveikaudami stipriąja sąveika, laiko vieni kitus sankaupoje. Norint suskaldyti branduolį į pavienius nukleonus, reikia nugalėti branduolinę sąveiką, t. y. padidinti šių dalelių branduolinės sąveikos energiją. Ši energija vadinama **branduolio ryšio energija**. Branduoliui susidarant iš atskirų nukleonų, jie išskirs energiją, lygią branduolio ryšio energijai. Kintant branduolio dalelių energijai, kinta ir jų masė. Dėl to branduolio masė visada mažesnė už jį sudarančių nukleonų masių sumą:

$$M_{\mathrm{b}} < Z \cdot m_{\mathrm{p}} + N \cdot m_{\mathrm{n}}.$$

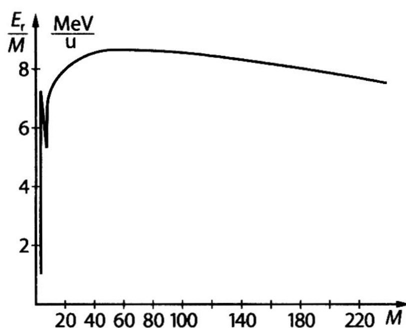
Branduolio ryšio energiją galima išreikšti taip:

$$E_r = \Delta M c^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_b)c^2.$$

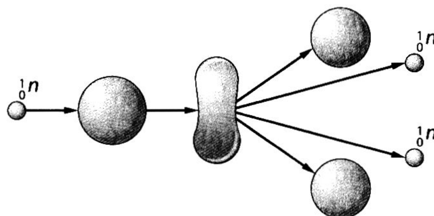
Pastaba: skaičiuojant **masės defektą** ΔM ir ryšio energiją E_r, nukleonų ir branduolio mases reikia imti kiek įmanoma tikslesnes; negalima laikyti, kad atomo ir jo branduolio masės apytikriai lygios.

Ryšio energiją, tenkančią vienam nukleonui $\left(\frac{E_r}{M}\right)$, vadiname **specifine ryšio energija** (žr. 199 pav.).

Didžiausia specifinė ryšio energija (8,6 MeV nukleonui) būdinga vidutinės (50–60 u) masės branduolius sudarantiems nukleonams, todėl cheminių elementų, esančių periodinės elementų lentelės viduryje, branduoliai yra patys stabiliausi. Visų medžiagų, kurių eilės numeris periodinėje elementų lentelėje didesnis už 82, branduoliai nėra stabilūs. Jie tampa stabilesni spinduliuodami α daleles. Sunkiųjų branduolių stabilumas didėja jiems dalijantis. Branduoliai dalijasi ne tik susidurdami su neutronais, bet ir spontaniškai. Neutronų sukeliamo dalijimosi mechanizmą vaizdžiai paaiškina lašelininis branduolio modelis (žr. 200 pav.). Pagal šį modelį, pataikęs į branduolį neutronas jį deformuoja taip, kad atitolusių viena nuo kitos branduolio dalių branduolinė sąveika tampa silpnesnė už jų tarpusavio elektrinę stūmą. Gautos skeveldros (du nauji branduoliai), veikiamos elektrinės stūmos, įgyja dideles kinetines energijas. Be to, vietoj vieno absorbuoto neutrono atsiranda 2–3 nauji laisvi neutronai, kurie suskaldo kitus branduolius, o iš jų išlėkę neutronai – dar daugiau branduolių ir t. t. Tokia savaime besiplečianti branduolinė reakcija vadinama **grandinine dalijimosi reakcija.** Svarbiausia yra tai, kad skylant vienam urano branduoliui išsiskiria milžiniška energija – apie 200 MeV.



199 pav.



200 pav.

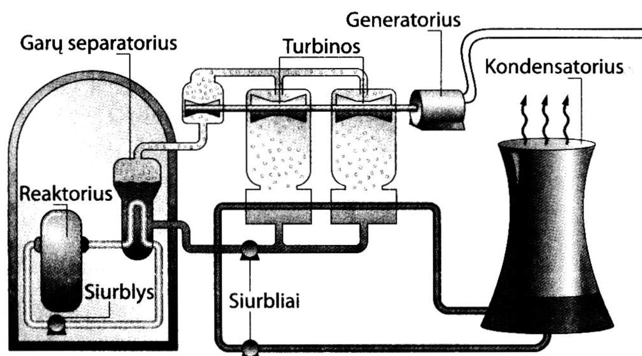
Stabilių medžiagų branduoliuose esančių neutronų skaičius lygus protonų skaičiui arba nežymiai didesnis. Jei neutronų yra gerokai daugiau nei protonų, tokie branduoliai β radioaktyvūs. Kadangi dalijantis urano branduoliams skeveldrų branduoliuose neutronų gerokai daugiau, paprastai skilimo produktai yra radioaktyvūs izotopai.

Jeigu po branduolinės reakcijos gautų medžiagų masė didesnė už buvusią prieš reakciją (masės defektas teigiamas), vadinasi, jos metu turėta dalelių kinetinė energija buvo sunaudota. Kaip tik tokia yra azoto apšaudymo α dalelėmis reakcija. Tačiau radioaktyviųjų virsmų bei sunkiųjų branduolių dalijimosi metu gautų produktų masė yra mažesnė už turėtų prieš reakciją (neigiamas masės defektas), todėl tokios reakcijos gali būti energijos šaltinis.

Įrenginys, kuriame vykstant urano grandininei reakcijai gaunama energija, vadinamas **branduoliniu reaktoriumi.** Jame gauta energija panaudojama elektros energijos gamybai atominėse elektrinėse. Branduolinis kuras reaktoriuose – $^{235}_{92}U$ izotopas, kurio branduoliai dalijasi veikiami tiek lėtųjų, tiek greitųjų neutronų. Tačiau gamtiniame urane šio izotopo yra 140 kartų mažiau nei $^{238}_{92}U$. $^{238}_{92}U$ branduoliai dalijasi tik veikiami greitųjų neutronų: maža to, apytikriai vienas iš 5 neutronų sukelia $^{238}_{92}U$ dalijimąsi. Kitus 4 neutronus absorbavę branduoliai virsta $^{239}_{92}U$. Šis radioaktyvusis izotopas po dviejų β skilimų virsta plutoniu $^{239}_{94}Pu$, kuris gali būti panaudotas grandininėms reakcijoms. Kad grandininė reakcija vyktų, gryno urano $^{235}_{92}U$ kritinė masė turi būti 50 kg, plutonio $^{239}_{94}Pu$ – 10 kg. Jei masė mažesnė, reakcija nevyksta, nes neutronų daugėjimo koeficientas $k<1$. **Daugėjimo koeficientu** laikome neutronų, sukėlusių branduolių dalijimąsi, skaičiaus santykį su neutronų, sukėlusių dalijimąsi, kurio metu buvo gauti šie neutronai, skaičiumi. Jeigu $k > 1$, reakcija aktyvėja, išsiskiriančios energijos kiekis didėja. Kai $k = 1{,}01$, beveik akimirksniu įvyksta sprogimas, todėl labai svarbu palaikyti tiksliai $k = 1$. Reaktoriuje tai užtikrina kadmio arba boro strypai, kurie gerai absorbuoja neutronus. Kai branduolinio kuro masė mažesnė už kritinę, $k < 1$, nes didžioji dalis atsiradusių neutronų išlekia į išorę. Kritinę branduolinio kuro masę galima sumažinti reaktorių apsupant neutronų reflektoriumi –

gerai atspindinčia neutronus medžiaga (pavyzdžiui, grafito plokštėmis). Reflektorius grąžina atgal išlekiančius iš urano neutronus ir sustiprina reakciją.

Naudojami dviejų tipų reaktoriai: lėtųjų ir greitųjų neutronų. Kad reaktoriuje vyktų grandininė reakcija, branduolinis kuras (gamtinis uranas) turi būti iki 5 % prisodrintas $^{235}_{92}U$ bei sulėtinti atsirandantys neutronai (kad jų neabsorbuotų $^{238}_{92}U$). Kai neutralus gamtinis uranas prisodrinamas virš 15 % $^{235}_{92}U$, grandininė reakcija gali vykti ir nesulėtinus neutronų. Kaip neutronų lėtiklis naudojamas grafitas arba sunkusis vanduo. Šis susidaro jungiantis deuteriui su deguonimi arba paprastam vandeniui absorbuojant neutronus.



201 pav.

Taigi 201 paveikslėlyje pavaizduotą **atominę elektrinę** sudaro: branduolinis reaktorius, garintuvas, garo turbina, generatorius. Branduolinio reaktoriaus aktyviojoje zonoje yra grafito blokuose išdėstyti sodrinto urano strypai. Reaktorių supa neutronų reflektorius. Įleidžiamais į aktyviąją zoną kadmio arba boro strypais reguliuojamas dalijimosi reakcijų skaičius (neutronų daugėjimo koeficientas), t. y. valdomas reaktorius. Aktyviojoje zonoje esančiais kanalais cirkuliuoja šilumnešis (vanduo arba skystas natris), kuris garintuve garina vandenį. Gauti aukštos temperatūros ir didelio slėgio garai suka garo turbiną, o ši – generatorių.

Branduolių dalijimosi reakcija nėra vienintelis atominės energijos šaltinis. Neigiamas masės defektas taip pat gaunamas lengvųjų branduolių jungimosi (sintezės) metu. Pavyzdžiui, įvykus deuterio ir tričio

sintezei, gauto helio ir neutrono masių suma yra mažesnė už deuterio ir tričio masių sumą: ${}_1^2H + {}_1^3H \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n$. Tačiau kad vyktų lengvųjų branduolių jungimasis, jie turi suartėti tiek, kad atsiradusi branduolinė trauka taptų stipresnė už elektrinę stūmą. Tam vandenilio izotopų branduoliai turi turėti dideles kinetines energijas, kurias įgyja tik aukštoje temperatūroje. Todėl lengvųjų branduolių sintezės reakcijos dar vadinamos **termobranduolinėmis**. Jos vyksta žvaigždžių (tarp jų ir Saulės) gelmėse. Šios reakcijos yra jų energijos spinduliavimo šaltinis. Žemėje termobranduolinė reakcija kol kas vyksta tik termobranduolinės (vandenilinės) bombos sprogimo metu ir yra nevaldoma. Šiuo metu intensyviai ieškoma galimybių jai valdyti. Valdomos vandenilio izotopų sintezės reakcijos būtų neišsenkamas energijos šaltinis. Tokios reakcijos metu susidarant 1 helio branduoliui išsiskiria 17,5 MeV energijos. Taigi 4 kartus daugiau jos tenka vienam nukleonui negu dalijantis urano branduoliui.

VI. ASTRONOMIJA

Kaupiantis žinioms apie aplinkos reiškinius, keitėsi pasaulio suvokimas. Pirmosios kelionės aplink Žemę burlaiviais ir ant Mėnulio stebimo Žemės šešėlio krašto forma leido suvokti, kad Žemė ne plokščia, o apvali. Kadangi vykstančių reiškinių stebėtojas – žmogus, buvo natūralu atskaitos tašku pasirinkti stebėtojo vietą. Todėl viename pirmųjų pasaulio modelių – Ptolemėjo sukurtoje geocentrinėje pasaulio sistemoje – Visatos centru buvo laikoma Žemė. Ptolemėjas manė, kad aplink nejudančią Žemę skrieja Saulė ir Mėnulis bei sukasi dangaus skliautas su nejudančiomis viena kitos atžvilgiu žvaigždėmis. Kad būtų lengviau įsidėmėti jų tarpusavio išsidėstymą, mintyse sujungus charakteringas žvaigždes imta įsivaizduoti įvairios formos figūras – **žvaigždynus**. Dabar mes žvaigždynu laikome tam tikrą dangaus skliauto plotą (tiksliau kūgį, kurio viršūnėje yra stebėtojas), kur yra žvaigždynui priklausančios tarpusavyje nesusijusios žvaigždės. Visa dangaus sfera skirstoma į 88 žvaigždynus. Tačiau buvo pastebėta, kad keletas šviesulių, atrodančių lygiai taip pat kaip ir žvaigždės, neturi pastovios vietos dangaus skliaute. Šie šviesuliai pavadinti **planetomis** (iš graikų k. „planete“ – klajojanti žvaigždė). Kilpišką planetų judėjimą Ptolemėjas aiškino jų skriejimu aplink tam tikrus

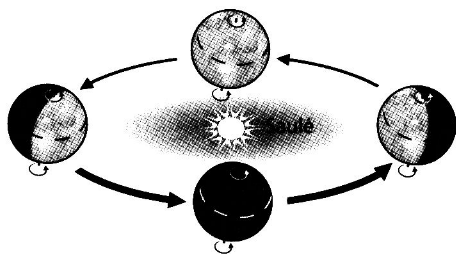
taškus, kurie savo ruožtu sukasi aplink Žemę. Kuo tikslesni buvo stebėjimų rezultatai, tuo sudėtingiau buvo juos paaiškinti. Apibendrindamas trisdešimties metų darbo rezultatus, Mikalojus Kopernikas suprato, kad Žemė tėra toks pat dangaus kūnas kaip ir kitos planetos. Jo sukurtoje **heliocentrinėje pasaulio sistemoje** pagrindinis kūnas mums artimiausioje Visatos dalyje yra Saulė, aplink kurią skrieja planetos. Šiuo metu žinomos devynios planetos. Visos jos skrieja ta pačia kryptimi. Planetų orbitos yra mažai ištęstų elipsių (artimų apskritimams) formos. Jų plokštumos beveik sutampa. Arčiausiai Saulės skrieja Merkurijus, toliau – Venera, Žemė, Marsas, Jupiteris, Saturnas, Uranas, Neptūnas. Labiausiai nutolusi orbitoje planeta – Plutonas. Planetų nuotolis nuo Saulės nusakomas milijonais kilometrų arba astronominiais vienetais. **Astronominiu vienetu** laikome vidutinį Žemės nuotolį nuo Saulės; jis lygus 150 milijonų kilometrų (1 av = $150 \cdot 10^6$ km). Daugelis planetų turi aplink jas skriejančius kūnus – palydovus.

Pagal padėtį, dydį, cheminę sudėtį ir daugelį kitų požymių planetos skirstomos į 2 grupes: Žemės tipo planetas (Merkurijus, Venera, Žemė, Marsas) ir planetas milžines (Jupiteris, Saturnas, Uranas, Neptūnas). Tolimiausia ir mažiausia planeta – Plutonas – nepriklauso nė vienai šių grupių. Manoma, kad tolimoje praeityje Plutonas buvo Neptūno palydovas, bet vėliau atitrūko ir tapo savarankiška planeta.

Planetos apskriejimo aplink Saulę žvaigždžių atžvilgiu periodas vadinamas **žvaigždiniais metais**. Kuo toliau nuo Saulės yra planeta, tuo mažesniu greičiu ji skrieja ir tuo ilgesni joje metai (žvaigždinis periodas). Dėl skirtingo skriejimo greičio vidinės planetos (Merkurijus ir Venera) lenkia Žemę, o ši – išorines planetas. Tuo ir paaiškinamas stebimų planetų klajojimas dangaus skliaute. Kadangi vien stebint negalima nustatyti, ar dangaus kūnas šviečia, ar tik atspindi šviesą, buitinėje kalboje planetas vadiname žvaigždėmis.

Vidinės planetos visada yra netoli Saulės, todėl jos nematomos vidurnaktį. Arčiausiai Saulės esantis Merkurijus labai trumpai gali būti matomas po Saulės laidos arba prieš pat aušrą. Mūsų protėviai jį vadino Vaivora. Venera, kaip vienas ryškiausių šviesulių, matoma gerokai ilgiau. Kai Venera būna į vakarus nuo Saulės, ji matoma prieš aušrą ir vadinama Aušrine. Tris eilės tvarka po Žemės einančias išorines planetas taip pat nesunku pamatyti, todėl iš senovės jos turi ir lietuviškus vardus: Marsas – Žiezdrė, Jupiteris – Indraja, Saturnas – Selija.

Planetos ne tik skrieja aplink Saulę, bet ir sukasi apie savo ašį. Vieno apsisukimo trukmė (periodas) vadinama **para**. Regimasis



202 pav.

dangaus skliauto sukimasis yra Žemės sukimosi apie savo ašį rezultatas. Iš viršaus žiūrint į šiaurinį Žemės ašigalį, ji sukasi prieš laikrodžio rodyklę. Kartu su Žeme sukamės ir mes, tik to nejaučiame. Todėl mums atrodo, kad visas dangaus skliautas sukasi aplink mus iš rytų į vakarus. Sukdamasi apie savo ašį Žemė skrieja aplink Saulę ta pačia kryptimi – prieš laikrodžio rodyklę (202 pav.), todėl regimoji Saulės padėtis dangaus skliaute žvaigždžių atžvilgiu kinta. Kadangi per metus regimoji Saulės padėtis apkeliauja visą dangaus sferą, per parą Saulė pasislenka maždaug 1° kampu iš vakarų į rytus. Regimasis Saulės kelias dangaus skliautu vadinamas **ekliptika**. Ji eina per 12 žvaigždynų (**Zodiako žvaigždynų**) ir sudaro vadinamąją Zodiako juostą. Pabrėžtina, kad žvaigždyno, kuriame stebėjimo momentu yra Saulė, tuo metu nematome, nes žvaigždžių šviesą nustelbia Saulės šviesa. Jį galime pamatyti tik po pusmečio, vidurnaktį. Kadangi regimoji Saulės padėtis (esanti virš horizonto) kinta, tai Žemės apsisukimo periodai Saulės ir žvaigždžių atžvilgiu nesutampa. Saulinė para (24 h) yra maždaug keturiomis minutėmis trumpesnė už žvaigždinę (23 h 56 min), o žvaigždinių parų metuose yra viena daugiau nei saulinių.

Žemės sukimosi ašis nėra statmena skriejimo aplink Saulę (ekliptikos) plokštumai, todėl regimoji Saulės padėtis pusę metų būna šiauriniame, o kitą pusę metų pietiniame dangaus pusrutulyje. Dėl šios priežasties kinta metų laikai (pavasaris, vasara, ruduo, žiema), nakties ir dienos ilgis paroje. Tik pusiaujo gyventojams diena ir naktis trunka vienodai. Kuo arčiau geografinių ašigalių, tuo ryškesnis šis kitimas. Kovo 21 d. ir rugsėjo 23 d. Saulė būna dangaus pusiaujyje. Tuomet dienos ilgumas lygus nakties ilgumui. Šie Saulės padėties dangaus skliaute taškai vadinami **lygiadienio taškais**. Gruodžio 22 d. Saulė būna labiausiai nutolusi nuo dangaus pusiaujo į pietus. Tada diena trumpiausia, o naktis ilgiausia. Birželio 22 d. – atvirkščiai. Saulė tą dieną yra toliausiai šiauriniame dangaus pusrutulyje. Šie ekliptikos taškai vadinami **saulėgrįžos taškais.**

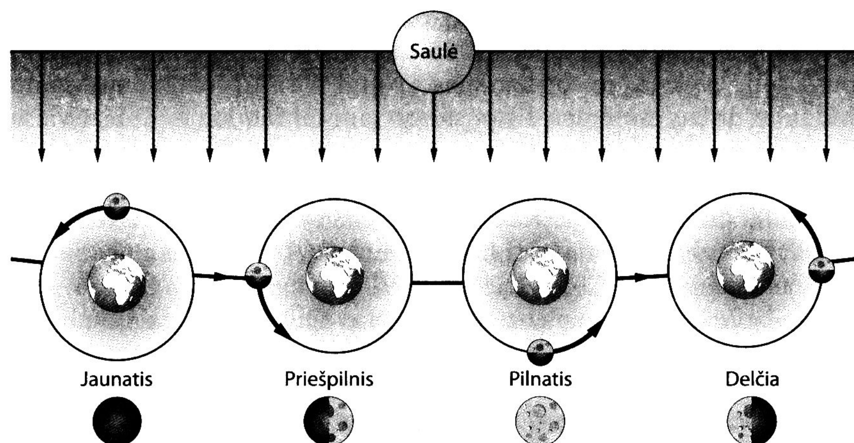
Dauguma planetų sukasi apie savo ašis ta pačia kryptimi, kaip ir skriedamos aplink Saulę. Tik Venera sukasi į priešingą pusę. Be to, jos sukimosi ašis beveik statmena skriejimo aplink Saulę plokštumai,

todėl Veneroje nekinta dienos ir nakties ilgis, nesikeičia metų laikai. Urano sukimosi ašis beveik guli skriejimo aplink Saulę plokštumoje, todėl jame vieną pusmetį yra diena, o kitą – naktis.

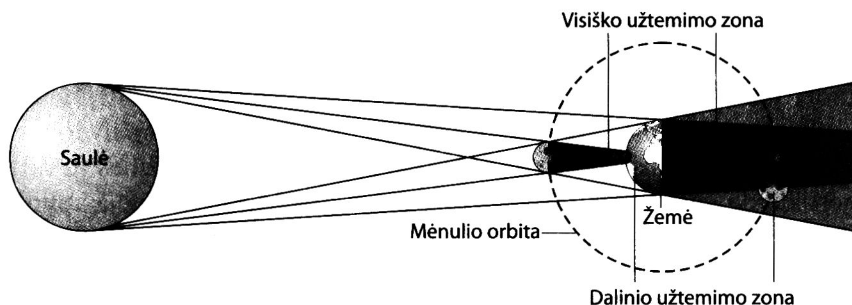
Visos planetos, išskyrus Merkurijų ir Venerą, turi palydovus. Žemė ir Plutonas – po vieną, Marsas – du. Planetos milžinės jų turi gerokai daugiau. Vienintelis Žemės palydovas Mėnulis skrieja aplink ją Žemės sukimosi kryptimi. Mėnulio apskriejimo aplink Žemę periodas vadinamas **mėnesiu**. Saulinis mėnuo lygus 29,5 paros, o žvaigždinis – 27,3 paros. Mėnulis ne tik skrieja aplink Žemę, bet ir sukasi apie savo ašį, į skriejimo pusę. Kadangi apsisukimo periodas sutampa su apskriejimo periodu, mes matome tik vieną Mėnulio pusę.

Dėl Mėnulio skriejimo aplink Žemę bei Žemės aplink Saulę kinta jų tarpusavio išsidėstymas, o kartu matomos apšviestos ir neapšviestos dalies dydžiai. Charakteringas apšviestos dalies vaizdas vadinamas **Mėnulio faze** (203 pav.). Kai Mėnulis yra tarp Saulės ir Žemės, mes jo nematome, kadangi jis nusileidžia kartu su Saule. Nuo šio momento prasideda jaunatis. Po ketvirčio mėnesio (maždaug po savaitės) matome pusę apšviesto ir pusę neapšviesto Mėnulio disko. Ši fazė vadinama priešpilniu. Dar po savaitės matoma visa apšviesta Mėnulio pusė – pilnatis. Paskutinioji fazė – delčia, kurios metu matome apšviestą priešingą priešpilniui Mėnulio disko pusę.

Mėnulis ir Žemė yra neskaidrūs kūnai, todėl už jų susidaro šešėlis ir pusšešėlis. Kai Žemė patenka į Mėnulio šešėlį ar pusšešėlį, įvyksta



203 pav.



204 pav.

Saulės užtemimas (204 pav.). Stebėtojai, esantys vietovėse, kurios patenka į Mėnulio šešėlį, mato visišką Saulės užtemimą. Jo metu Mėnulis visai uždengia Saulės diską. Vietovėse, patenkančiose į Mėnulio pusšešėlį, matomas dalinis Saulės užtemimas. Kadangi Žemė aplink Saulę ir Mėnulis aplink Žemę skrieja ne apskritimais, bet elipsėmis, atstumai tarp Žemės ir Saulės bei Mėnulio ir Žemės kinta. Kai užtemimo metu Žemė būna arčiausiai Saulės, o Mėnulis toliausiai nuo Žemės, šešėlio kūgis Žemės nepasiekia. Jeigu tokio dalinio užtemimo metu Saulės ir Mėnulio diskų centrai sutampa, stebime žiedinį Saulės užtemimą. Saulės užtemimas gali įvykti tik esant Mėnulio jaunačiai.

Kadangi Mėnulio orbitos plokštuma ne sutampa su ekliptikos plokštuma, o nedideliu kampu kerta ją, tai ne kiekvienos jaunaties metu Saulės užtemimas vyksta.

Kai Mėnulis patenka į Žemės šešėlį arba pusšešėlį, įvyksta **Mėnulio užtemimas** (žr. 204 pav.). Jeigu visas Mėnulis šešėlyje, – užtemimas visiškas, jei tik jo dalis – dalinis. Kai Mėnulis patenka į Žemės pusšešėlį, įvyksta jo pritemimas. Netgi visiško užtemimo metu Mėnulio diskas matomas, tik pasidaro tamsiai raudonas. Tokia šviesa jį apšviečia Žemės atmosferoje lūžę raudonieji Saulės spinduliai, o kitus spindulius atmosfera išsklaido ir sugeria. Mėnulio užtemimai vyksta tik pilnaties metu. Kadangi Žemės šešėlis didesnis už Mėnulio šešėlį, Mėnulio užtemimai trunka ilgiau ir įvyksta dažniau nei Saulės užtemimai.

Apibendrinant apie planetas sukauptas žinias reikia pažymėti, kad Žemės tipo planetos sudarytos daugiausiai iš silikatų ir metalų. Jos yra mažesnių matmenų ir masės, didesnio tankio, skrieja arčiau Saulės, lėčiau sukasi apie savo ašį, neturi arba turi nedaug palydovų. Planetos milžinės sudarytos iš lengvųjų cheminių elementų (vandenilio, helio). Jų matmenys ir masė daug didesni už Žemės tipo

planetų, tačiau tankis mažesnis. Planetos milžinės skrieja toliau nuo Saulės, dideliu greičiu sukasi apie savo ašį, turi žiedus ir daug palydovų.

Be devynių jau išvardintų planetų, aplink Saulę skrieja daugybė mažų, plika akimi nematomų dangaus kūnų – **asteroidų**. Asteroidais vadiname mažąsias planetas, kurių skersmuo svyruoja nuo 1 km iki 1000 km. Net 98 % visų asteroidų yra jų žiede tarp Marso ir Jupiterio.

Be asteroidų, per teleskopą dar galima pamatyti dangaus šviesulius su savotiškomis uodegomis – **kometas**. Kometą sudaro branduolys, galva ir uodega. Branduolys yra 1–50 km skersmens. Jo cheminė sudėtis – silikatai, metalų dulkės, sušalęs į ledą vanduo, amoniakas, metanas, anglies dioksidas, cianas ir kitos medžiagos. Kometai artėjant prie Saulės, jos branduolys pradeda garuoti. Susidariusi dujų skraistė gali būti net 1000 kartų didesnė už branduolį. Ji vadinama kometos galva. Nuo Saulės sklindantis vėjas (plazma) bei šviesa dalį susidariusios skraistės slėgdami nustumia tolyn. Dėl to atsiranda kometos uodega, kuri visada nukrypsta į priešingą Saulei pusę. Kometa švyti, atspindėdama Saulės šviesą. Be to, kometos galvoje ir uodegoje esančios dujos, paveiktos Saulės spindulių, taip pat ima švytėti. Kometos skrieja labai ištęstomis orbitomis. Jų apskriejimo periodai matuojami dešimtimis arba šimtais metų. Palankiomis sąlygomis (kai kometa labai priartėja prie Saulės), kometos galvos skersmuo gali siekti 1–2 milijonus kilometrų, o uodega tęsiasi dešimtis ar net šimtus milijonų kilometrų. Tuomet kometa tampa įžiūrima plika akimi. Viena žinomiausių yra Halio kometa, kuri pasirodo kas 76 metai. Žemės susidūrimo su kometa tikimybė labai maža. Yra pasitaikę atvejų, kai Žemė buvo patekusi į kometos uodegą, tačiau šios dujų tankis toks mažas, kad pastebimų padarinių Žemei tai nesukėlė. Pralėkdamos pro Saulę kometos kaskart netenka 0,2–0,5 % savo medžiagos, todėl jos nėra ilgaamžės.

Mažesnio nei 1 km skersmens kūnai, skriejantys aplink Saulę ir planetas, vadinami **meteoroidais** arba **meteoriniais kūnais**. Tai suirusių kometų liekanos, asteroidų nuolaužos. Pasitaiko Žemės susidūrimo su meteoroidais atvejų. Dideliu greičiu į Žemės atmosferą įlėkęs meteoroidas dėl trinties smarkiai įkaista ir tampa švytinčiu meteoru, kuris vadinamas „krintančia žvaigžde". Dauguma meteoroidų išgaruoja ir sudega nepasiekę Žemės paviršiaus. Į Žemę nukritusios nespėjusio sudegti meteoroido liekanos vadinamos **meteoritais**. Pagal sudėtį meteoritai skirstomi į akmeninius, geležinius ir akmeninius-geležinius. Kasmet ant Žemės nukrinta iki 10^5 t meteoritų, nuo dulkės dydžio iki 1000 kg luitų. Atsitrenkdami į Žemę, dideli meteoritai išmuša kraterius – **astroblemas**.

Pagrindinis kūnas Saulės sistemoje – **Saulė**. Jos masė sudaro apie 99,86 % visos Saulės sistemos masės. Saulė – pagrindinis energijos šaltinis šioje Visatos dalyje. Tai karštos plazmos rutulys, sudarytas iš vandenilio (74,7 %) ir helio (23,7 %). Saulės energijos šaltinis yra jos gelmėse vykstančios termobranduolinės reakcijos: jų metu iš vandenilio susidaro helis. Dangaus kūnai, kuriuose vyksta šie procesai, vadinami **žvaigždėmis**. Saulė – vienintelė žvaigždė Saulės sistemoje. Pagal Saulėje vykstančius procesus išskiriamos tokios jos dalys: šerdis, spinduliavimo zona, konvekcijų zona, atmosfera. Slėgis ir temperatūra šerdyje yra tinkami termobranduolinėms reakcijoms, sudarančioms pagrindinį energijos šaltinį. Einant išorės link, dėl mažėjančio slėgio sąlygos, reikalingos vandeniliui virsti heliu, tampa nepalankios, todėl centrinę dalį supa medžiaga, kuri sugeria iš gelmių sklindančius fotonus ir vėl juos išspinduliuoja. Taigi Saulės gelmėse atsiradęs fotonas, po daugybės absorbcijų ir emisijų, maždaug per milijoną metų pasiekia Saulės paviršių. Perspinduliuojamų fotonų energija mažėja, nes dalį jos medžiaga praranda nespinduliuodama (kylant temperatūrai). Tokiu būdu gama spinduliai virsta rentgeno, ultravioletiniais, regimaisiais arba infraraudonaisiais spinduliais. Žvaigždės sritis, kurioje vyksta šie procesai, vadinama spinduliavimo zona. Toliau einant link Saulės išorės, aptinkama sritis, kurios temperatūra aukštesniuose sluoksniuose yra mažesnė už žemesnių sluoksnių, nes daugiau energijos išspinduliuojama negu absorbuojama. Dėl temperatūrų skirtumo šioje srityje vyksta plazmos maišymasis – konvekcija. Žvaigždės vieta, kurioje plazmos tankis sumažėjęs tiek, kad dauguma išspinduliuotų fotonų nebeabsorbuojami, vadinama žvaigždės paviršiumi. Virš Saulės paviršiaus esanti medžiaga vadinama Saulės atmosfera. Apatinis atmosferos sluoksnis – fotosfera – yra pagrindinis matomos šviesos spinduolis. Nuo fotosferos temperatūros priklauso, kokios spalvos fotonų fotosfera išspinduliuoja daugiausiai, t. y. kokia žvaigždės spalva. Šalčiausios yra raudonosios žvaigždės. Jų fotosferos temperatūra – apie 1500–3600 K. Karščiausios žydrosios žvaigždės, kurių temperatūra siekia iki 50 000 K. Pagal dydį žvaigždės skirstomos į supermilžines, milžines, submilžines, nykštukes, subnykštukes ir baltąsias nykštukes. Saulė priklauso geltonųjų nykštukių grupei. Jos fotosferos, kurios storis apie 200–300 km, temperatūra kinta nuo 8000 K apatiniame sluoksnyje iki 4000 K viršutiniame. Virš fotosferos esantis atmosferos sluoksnis vadinamas chromosfera. Čia plazma daug retesnė nei fotosferoje. Chromosferos temperatūra einant į išorę kyla, pasiekia apie milijoną kelvinų ir toliau beveik nekinta. Šis išretėjęs karštas atmosferos sluoksnis vadinamas Saulės vainiku.

Fotosferos nuotraukose gerai matoma jos struktūra – ryškūs „grūdeliai“, granulės. Apie 1000 km skersmens šviesias granules vieną nuo kitos skiria siauri, tamsūs tarpeliai. Granulės – tai konvekcijos metu iš gilesnių sluoksnių kylanti karšta plazma, kuri atvėsusi pakraščiuose leidžiasi žemyn. Kartkartėmis tamsūs tarpai ima didėti ir virsta dėmėmis, kurių skersmuo siekia 700–15 000 km. Tamsios jos atrodo todėl, kad plazmos temperatūra apie 1500 K žemesnė nei už jų ribų. Dėmės atsiranda ir vėl išnyksta. Vidutinio dydžio dėmės egzistuoja 10–20 parų, o didžiausios – net iki 100 parų. Dėmių skaičius periodiškai kinta ir yra susijęs su Saulės aktyvumo kitimu. Šio kitimo periodas – apie 11,2 metų. Sumažėjus Saulės aktyvumui, dėmių beveik nesimato. Jos pradeda atsirasti grupėmis, iš pradžių toliau nuo pusiaujo, paskui vis arčiau. Dažniausiai grupėje išryškėja dvi itin didelės dėmės, viena – rytuose, kita – vakaruose. Dėmių magnetiniai laukai labai stiprūs. Pagrindinių grupės dėmių magnetinis poliškumas priešingas. Magnetiniai laukai stipriai veikia plazmos judėjimą, o kartu ir jos tankį bei temperatūrą. Dėmių srityse sukeliami trumpalaikiai chromosferiniai žybsniai, kurių metu smarkiai padidėja išmetamų elektringų dalelių kiekis ir jų energija. Chromosferos išmestos elektringos dalelės po 1,5–2 dienų pasiekia Žemę ir jos magnetinį lauką, sukelia magnetines audras, prasiskverbia į atmosferą ir sukelia poliarines pašvaistes. Tokios dalelės turi įtakos Žemės klimatui, gyvūnams, augalams, žmonėms.

Saulė – viena iš aibės Visatoje egzistuojančių žvaigždžių. Minėjome, kad žvaigždės skirstomos į klases pagal spalvą (fotosferos temperatūrą). Žvaigždės – tai didžiuliai plazmos rutuliai, dėl gelmėse vykstančių termobranduolinių reakcijų skleidžiantys plataus diapazono (nuo infraraudonųjų iki rentgeno spindulių) elektromagnetines bangas bei įvairių dalelių srautus. Žvaigždžių skersmuo gali būti nuo kelių šimtųjų iki kelių šimtų Saulės skersmenų, o masė – nuo kelių dešimtųjų iki keleto dešimčių Saulės masių. Visos žvaigždės atrodo kaip šviečiantys taškai, nes jos, lyginant su Saule, yra labai toli. Atstumas nuo Saulės iki Žemės siekia maždaug vieną astronominį vienetą (apie $150 \cdot 10^6$ km). Šviesa nuo Saulės atsklinda maždaug per 8 min 20 s, o nuo kitos artimiausios žvaigždės – tik per 4,27 metų. Todėl įprasta atstumą iki žvaigždžių matuoti ne kilometrais ar astronominiais vienetais, bet šviesmečiais. **Šviesmečiu** laikome atstumą, kurį šviesa nueina per metus: 1 šm = $9{,}46 \cdot 10^{12}$ km = 63240 av. Taigi žiūrėdami į žvaigždėtą dangų turime suvokti, kad matome ne dabartinę jo būklę, bet tolimą praeitį.

Žvaigždės Visatoje nėra pasiskirsčiusios tolygiai. Dėl tarpusavio gravitacijos jos sudaro žvaigždžių sankaupas – **galaktikas**. Saulė su visa savo planetų sistema priklauso didžiulei apie 250 milijardų žvaigždžių sistemai – **mūsų Galaktikai** (norėdami pabrėžti, kad į ją įeina ir Saulė, žodį Galaktika rašome didžiąja raide). Mūsų Galaktika yra besisukančio lęšio formą primenantis žvaigždžių telkinys. Jos centre – maždaug 8000 šviesmečių spindulio centrinis žvaigždžių telkinys, turintis apie 5 % visų Galaktikos žvaigždžių. Šis telkinys yra apie 120 000 šviesmečių skersmens disko centre. Iš viso diske susitelkę apie 90 % visų Galaktikos žvaigždžių. Jos čia išsidėsčiusios spiralių formos vijomis. Diską gaubia apie 80 000 šm spindulio sferoidas. Už šio sferoido yra apie 70 000 šm spindulio Galaktikos vainikas. Visa minima žvaigždžių sistema sukasi apie Galaktikos centrą. Saulė yra vienoje iš disko vijų, maždaug 28 000 šm atstumu nuo Galaktikos centro. Skriedama 220 km/s greičiu, ji apskrieja apie Galaktikos centrą per 230 milijonų metų.

Žvaigždėtą naktį dangaus skliaute matome jį kertančią balzganą juostą – Paukščių Taką. **Paukščių Takas** – tai mūsų matoma Galaktikos dalis, kurią sudaro milijardai žvaigždžių. Žiemą ir pavasarį matomas Paukščių Takas yra siauras ir ne toks šviesus, nes tuo metu mes žvelgiame į Galaktikos išorę. Vasarą ir rudenį Paukščių Takas daug platesnis ir šviesesnis. Centrinė Galaktikos dalis, kurioje esanti tarpžvaigždinė medžiaga smarkiai sulaiko šviesą, dalija jį į dvi vagas.

Galaktikoje žvaigždės grupuojasi į padrikuosius ir kamuolinius spiečius. Visos Lietuvoje plika akimi matomos žvaigždės priklauso mūsų Galaktikai, išskyrus Andromedos žvaigždyne matomą šviesią dėmelę – Andromedos ūką. Kai pagaliau pavyko nustatyti atstumą iki jo, paaiškėjo, kad šis žvaigždžių telkinys yra labai toli už mūsų Galaktikos ribų. Andromedos ūkas – į mūsų Galaktiką panaši spiralinė galaktika. Kitos galaktikos matomos tik per teleskopą. Pagal tam tikrus požymius jos skirstomos į spiralines, elipsines, netaisyklingąsias ir pekuliarines. Elipsinės galaktikos apie savo centrą sukasi daug lėčiau, todėl jos gerokai mažiau susiplojusios negu spiralinės. Mums artimiausios yra dvi netaisyklingos galaktikos – Didysis ir Mažasis Magelano Debesys; jos matomos iš pietinio Žemės pusrutulio.

Galaktikos sudaro galaktikų grupes, šios – galaktikų debesis, o pastarieji – galaktikų spiečius. Galaktikų grupes, debesis, spiečius ir pavienes galaktikas (jų visumą) vadiname **Metagalaktika**.

DALYKINĖ RODYKLĖ

PRIEDAI

1. Valstybinio brandos egzamino formulės

Mechanika

$$\vec{v}=\frac{\vec{s}}{t},\ \vec{a}=\frac{\vec{v}-\vec{v}_0}{t},\ s_x=v_{0x}t+\frac{a_x t^2}{2},\ v=\frac{2\pi R}{T},\ a=\frac{v^2}{R},\ n=\frac{1}{T},\ \vec{F}=m\vec{a},\ \vec{F}=m\vec{g},$$

$$\vec{P}=m(\vec{g}-\vec{a}),\quad F=\mu N,\quad F=kx,\quad F=G\frac{m_1m_2}{R^2},\quad F=\rho_{sk}Vg,\ \vec{p}=m\vec{v},\ \vec{F}\Delta t=m\Delta\vec{v},$$

$$m_1\vec{v}_{01}+m_2\vec{v}_{02}=m_1\vec{v}_1+m_2\vec{v}_2,\quad E_k=\frac{mv^2}{2},\quad E_p=mgh,\quad E_p=\frac{kx^2}{2},\quad A=Fs\cos\alpha,$$

$$N=\frac{A}{t},\ A=E_{k2}-E_{k1},\ A=E_{p1}-E_{p2},\ M=Fl,\ \eta=\frac{A_n}{A_v}\cdot 100\%.$$

Molekulinė fizika

$$M=m_0N_A,\quad N=\frac{m}{M}N_A,\quad \rho=\frac{m}{V},\quad n=\frac{N}{V},\quad p=\frac{1}{3}nm_0\overline{v^2},\quad \overline{E_k}=\frac{3}{2}kT,$$

$$T=t+273,\quad pV=\frac{m}{M}RT,\quad \varphi=\frac{p}{p_s}\cdot 100\%=\frac{\rho}{\rho_0}\cdot 100\%,\quad F_{it}=\sigma\cdot l,\quad h=\frac{2\sigma}{\rho gr},$$

$$\sigma=E|\varepsilon|,\ \varepsilon=\frac{\Delta l}{l_0},\ \sigma=\frac{F}{S},\ U=\frac{3}{2}\frac{m}{M}RT,\ Q=cm\Delta t,\ Q=\lambda m,\ Q=Lm,\ Q=qm,$$

$$A'=p\Delta V,\ \Delta U=Q+A,\ \eta_{max}=\frac{T_1-T_2}{T_1},\ \eta=\frac{A'}{Q_1}.$$

Elektrodinamika

$$F=k\frac{q_1q_2}{R^2},\ \ \vec{E}=\frac{\vec{F}}{q},\ \ E=\frac{U}{\Delta d},\ \ A=qEd,\ \ C=\frac{q}{U},\ \ C=\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},\ \ W_p=\frac{CU^2}{2},$$

$$C=C_1+C_2+\ldots+C_n,\quad \frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\ldots+\frac{1}{C_n},\quad \varepsilon=\frac{E_0}{E},\quad I=\frac{q}{t},\quad I=\frac{U}{R},$$

$$R=\rho\frac{l}{S},\ \mathcal{E}=\frac{A_{paš}}{q},\ I=\frac{\mathcal{E}}{R+r},\ I=I_1=I_2,\ U=U_1=U_2,\ R=R_1+R_2,\ I=I_1+I_2,$$

$$U=U_1=U_2,\ \frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2},\ A=UIt,\ P=\frac{A}{t},\ m=kI\Delta t,\ F=BIl\sin\alpha,\ F=qvB\sin\alpha,$$

$$\mu=\frac{B}{B_0},\quad \Phi=BS\cos\alpha,\quad \mathcal{E}=-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},\ W=\frac{LI^2}{2},\ \mathcal{E}=-L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Svyravimai ir bangos

$$x = x_{\mathrm{m}} \cos \omega t, \quad \varphi = \omega t, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad \omega = 2\pi f, \quad q = q_{\mathrm{m}} \cos \omega t,$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \; i = I_{\mathrm{m}} \sin \omega t, \; u = U_{\mathrm{m}} \sin \omega t, \; I = \frac{I_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}}, \; U = \frac{U_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}}, \; X_C = \frac{1}{\omega C}, \; X_L = \omega L,$$

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}, \quad v = \lambda f, \quad \Delta d = k\lambda, \quad \Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, \quad d \sin \varphi = k\lambda, \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta},$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad D = \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$

Modernioji fizika

$$E = hf, \quad hf = A + \frac{mv^2}{2}, \quad hf_{\mathrm{min}} = A_{\mathrm{iš}}, \quad eU_S = \frac{mv^2}{2}, \quad E = mc^2, \quad A = Z + N,$$

$$f = \frac{|E_k - E_n|}{h}, \quad E_{\mathrm{r}} = \Delta M c^2 = (Z \cdot m_{\mathrm{p}} + N \cdot m_{\mathrm{n}} - M_{\mathrm{b}})c^2, \quad N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}.$$

2. Formulių paaiškinimai

Mechanika

$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$ – tiesiaeigio tolyginio judėjimo greičio apibrėžimas.

$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ – tolygiai kintamo judėjimo pagreičio apibrėžimas. Iš čia $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ – tolygiai kintamo judėjimo dėsnis – greičio priklausomybė nuo judėjimo trukmės.

$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ – tolygiai kintamo judėjimo dėsnis – poslinkio projekcijos priklausomybė nuo judėjimo trukmės.

$v = \frac{2\pi R}{T}$ – tolyginio judėjimo apskritimu greičio modulio ryšys su trajektorijos kreivumo spinduliu ir judėjimo periodu.

$a = \frac{v^2}{R}$ – tolyginio judėjimo apskritimu įcentrinio pagreičio modulio ryšys su judėjimo greičiu ir apskritimo spinduliu.

$n = \frac{1}{T}$ arba $f = \frac{1}{T}$ – tolyginio judėjimo apskritimu, tolyginio sukimosi bei harmoninio svyravimo dažnio ryšys su periodu.

$\vec{F} = m\vec{a}$ – jėgos apibrėžimas. Iš čia $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ – II Niutono dėsnis – kūno pagreičio priklausomybė nuo jį veikiančios jėgos ir kūno masės.

$\vec{F} = m\vec{g}$ – sunkio jėgos priklausomybė nuo kūno masės.

$\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$ – kūno svorio jėgos priklausomybė nuo jo masės ir judėjimo pagreičio.

$F = \mu N$ – trinties jėgos priklausomybė nuo paviršių lygumo (trinties koeficiento) ir kūnų prispaudimo (reakcijos jėgos).

$F = kx$ – Huko dėsnis – tamprumo jėgos priklausomybė nuo kūno deformacijos ir jo standumo.

$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2}$ – visuotinės traukos dėsnis – kūnų gravitacinės sąveikos jėgos priklausomybė nuo jų masių ir atstumo tarp jų.

$F = \rho_{sk} V g$ – Archimedo jėgos priklausomybė nuo panardinto kūno (jo dalies) tūrio bei supančio skysčio (dujų) tankio.

$\vec{p} = m\vec{v}$ – kūno impulso (judesio kiekio) apibrėžimas.

$\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$ – jėgos impulso ryšys su kūno judesio kiekiu (jo pokyčiu). Iš čia $m\Delta\vec{v} = \vec{F}\Delta t$ – kūno judesio kiekio pokyčio priklausomybė nuo jį veikiančios jėgos impulso.

$m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2$ – kūnų impulsų tvermės dėsnis.

$E_k = \frac{mv^2}{2}$ – kūno kinetinės energijos ryšys su jo mase ir judėjimo greičiu.

$E_p = mgh$ – Žemės veikiamo kūno potencinės energijos ryšys su jo mase ir pakilimo aukščiu.

$E_p = \frac{kx^2}{2}$ – tampraus deformuoto kūno potencinės energijos ryšys su deformacijos dydžiu ir kūno standumu.

$A = Fs\cos\alpha$ – mechaninio darbo apibrėžimas.

$N = \frac{A}{t}$ – galios apibrėžimas.

$A = E_{k2} - E_{k1}$ – kinetinės energijos teorema – kūną veikiančių jėgų atstojamosios atlikto darbo ryšys su kūno kinetine energija.

$A = E_{p1} - E_{p2}$ – potencinės energijos teorema – kūną veikiančios sunkio jėgos (Žemės) arba tampraus deformuoto kūno atlikto darbo ryšys su kūno potencine energija.

$\eta = \frac{A_n}{A_v} \cdot 100\%$ – paprastųjų mechanizmų naudingumo koeficiento apibrėžimas.

$M = Fl$ – jėgos momento apibrėžimas.

Molekulinė fizika

$M = m_0 N_A$ – molio masės apibrėžimas.

$N = \frac{m}{M} N_A$ – kūno molekulių (atomų) skaičiaus priklausomybė nuo medžiagos kiekio.

$\rho = \frac{m}{V}$ – tankio apibrėžimas.

$n = \frac{N}{V}$ – dalelių (molekulių) koncentracijos apibrėžimas.

$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$ – pagrindinė molekulinės kinetinės teorijos lygtis – dujų slėgio priklausomybė nuo koncentracijos ir greičių kvadratų vidurkio bei vienos molekulės masės.

$\overline{E_k} = \frac{3}{2} kT$ – dalelės (molekulės) vidutinės kinetinės energijos ryšys su dujų absoliutine temperatūra.

$T = t + 273$ – absoliutinės ir Celsijaus temperatūrų ryšys.

$pV = \frac{m}{M} RT$ – dujų būsenos (Mendelejevo ir Klapeirono) lygtis – dujų būseną apibūdinančių makroskopinių parametrų (slėgio, tūrio ir absoliutinės temperatūros) ryšys.

$\varphi = \frac{p}{p_s} \cdot 100\% = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100\%$ – santykinės drėgmės apibrėžimas.

$F_{\text{įt.}} = \sigma \cdot l$ – skysčio paviršiaus įtempimo jėgos priklausomybė nuo jo paviršiaus įtempimo koeficiento ir veikimo linijos ilgio.

$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ – skysčio pakilimo (nusileidimo) aukščio priklausomybė nuo skysčio paviršiaus įtempimo koeficiento, jo tankio ir kapiliaro spindulio.

$\sigma = E|\varepsilon|$ – Huko dėsnis (nauja jo išraiška) – mechaninės įtampos priklausomybė nuo santykinės deformacijos ir medžiagos rūšies.

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ – santykinės deformacijos apibrėžimas.

$\sigma = \frac{F}{S}$ – mechaninės įtampos apibrėžimas.

$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$ – idealiųjų vienatomių dujų vidinės energijos ryšys su medžiagos kiekiu ir absoliutine temperatūra.

$Q = cm\Delta t$ – kūno vidinės energijos pokyčio ryšys su jo savitąja šiluma, mase ir temperatūros pokyčiu vykstant šilumos mainams.

$Q = \lambda m$ – kūno vidinės energijos pokyčio ryšys su jo savitąja lydymosi šiluma ir mase.

$Q = Lm$ – skysčio vidinės energijos pokyčio jam išgaruojant ryšys su jo savitąja garavimo šiluma ir mase.

$Q = qm$ – sudeginto kuro sušildytų kūnų vidinės energijos pokyčio priklausomybė nuo sudegusio kuro kaloringumo ir masės.

$A' = p\Delta V$ – izobariškai išsiplėtusių dujų atlikto darbo ryšys su jų slėgiu ir tūrio pokyčiu.

$\Delta U = Q + A$ – I termodinamikos dėsnis – kūno vidinės energijos pokyčio priklausomybė nuo jį veikiančių jėgų darbo ir „suteikto“ šilumos kiekio.

$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ – idealios šiluminės mašinos naudingumo koeficiento ryšys su šildytuvo ir aušintuvo absoliutine temperatūra.

$\eta = \frac{A'}{Q_1}$ – realios šiluminės mašinos naudingumo koeficiento ryšys su jos atliktu darbu ir iš šildytuvo gautu šilumos kiekiu.

Elektrodinamika

$F = k\frac{q_1 q_2}{R^2}$ – elektrinės sąveikos (Kulono) dėsnis – įelektrintų kūnų sąveikos jėgos priklausomybė nuo jų krūvių ir atstumo tarp jų.

$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ – elektrinio lauko stiprio apibrėžimas.

$E = \frac{U}{\Delta d}$ – vienalyčio elektrinio lauko stiprio ryšys su įtampa tarp dviejų lauko taškų ir atstumo tarp ekvipotencialinių paviršių, einančių per tuos taškus.

$A = qEd$ – vienalyčio elektrinio lauko darbo, atlikto perkeliant įelektrintą kūną, ryšys su to kūno krūviu, elektrinio lauko stipriu ir atstumo tarp galinę ir pradinę padėtis atitinkančių ekvipotencialinių paviršių.

$C = \frac{q}{U}$ – kondensatoriaus elektrinės talpos apibrėžimas.

$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ – plokščiojo kondensatoriaus elektrinės talpos priklausomybė nuo atstumo tarp plokščių, jų persidengimo ploto ir jas skiriančio dielektriko dielektrinės skvarbos.

$W_p = \frac{CU^2}{2}$ – įkrauto kondensatoriaus energijos ryšys su jo elektrine talpa ir įtampa tarp laidininkų.

$C = C_1 + C_2 + ... + C_n$ – lygiagrečiai sujungtų kondensatorių baterijos talpos ryšys su jų talpomis.

$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ... + \frac{1}{C_n}$ – nuosekliai sujungtų kondensatorių baterijos talpos ryšys su jų talpomis.

$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$ – dielektriko dielektrinės skvarbos apibrėžimas.

$I = \frac{q}{t}$ – elektros srovės stiprio apibrėžimas.

$I = \frac{U}{R}$ – Omo dėsnis grandinės daliai – elektros srovės stiprio priklausomybė nuo įtampos laidininko galuose ir jo varžos.

$R = \rho \frac{l}{S}$ – laidininko varžos priklausomybė nuo jo matmenų (ilgio ir skerspjūvio ploto) bei medžiagos rūšies (savitosios varžos).

$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{paš}}}{q}$ – elektrovaros apibrėžimas.

$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$ – Omo dėsnis uždarai grandinei – srovės stiprio priklausomybė nuo elektros šaltinio elektrovaros ir išorinės bei vidinės (šaltinio) varžų.

$I = I_1 = I_2$, $U = U_1 + U_2$, $R = R_1 + R_2$ – nuoseklaus laidininkų jungimo elektros srovės stiprio, įtampos, varžos dėsningumai.

$I = I_1 + I_2$, $U = U_1 = U_2$, $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ – lygiagretaus laidininkų jungimo elektros srovės stiprio, įtampos, varžos dėsningumai.

$A = UIt$ – sukeliančio elektros srovę elektrinio lauko bei elektros srovės (elektringųjų dalelių) atlikto darbo ryšys su elektrinio lauko įtampa, srovės stipriu ir jos tekėjimo trukme (laiku).

$P = \frac{A}{t}$ – galios apibrėžimas.

$m = kIt$ – elektrolizės (Faradėjaus) dėsnis – ant elektrodo nusėdusios medžiagos masės priklausomybė nuo elektros srovės stiprio, jos tekėjimo trukmės (laiko) bei medžiagos elektrocheminio ekvivalento.

$F = BIl \sin\alpha$ – Ampero dėsnis – magnetinio lauko veikimo laidininkui (Ampero jėgos) priklausomybė nuo magnetinio lauko indukcijos, laidininko ilgio, jo padėties lauko atžvilgiu ir juo tekančios srovės stiprio.

$F = qvB \sin\alpha$ – magnetinio lauko veikimo jame judančiai elektringai dalelei (Lorenco jėgos) priklausomybė nuo magnetinio lauko indukcijos, dalelės krūvio, judėjimo greičio ir krypties lauko atžvilgiu.

$\mu = \frac{B}{B_0}$ – magnetinės skvarbos apibrėžimas.

$\Phi = BS\cos\alpha$ – magnetinio lauko srauto apibrėžimas.

$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ – elektromagnetinės indukcijos dėsnis – indukuotosios elektrovaros priklausomybė nuo magnetinio lauko srauto kitimo.

$W = \frac{LI^2}{2}$ – laidininko ir jo magnetinio lauko energijos ryšys su laidininko induktyvumu ir juo tekančios elektros srovės stipriu.

$\varepsilon = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$ – saviindukcijos dėsnis – saviindukcijos elektrovaros priklausomybė nuo laidininko induktyvumo ir juo tekančios elektros srovės stiprio kitimo greičio.

Svyravimai ir bangos

$x = x_m \cos\omega t$ – harmoningai svyruojančio kūno koordinatės kitimo dėsnis – koordinatės priklausomybė nuo svyravimo trukmės (laiko).

$\varphi = \omega t$ – praėjusios svyravimo fazės apibrėžimas.

$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ – matematinės svyruoklės svyravimo periodo priklausomybė nuo jos ilgio ir laisvojo kritimo pagreičio.

$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ – tampraus deformuoto kūno (spyruoklės) veikiamo kūno svyravimo periodo priklausomybė nuo jo masės ir spyruoklės standumo.

$\omega = 2\pi f$ – kampinio svyravimo dažnio apibrėžimas.

$q = q_m \cos\omega t$ – krūvio kitimo dėsnis harmoninio elektrinio virpesio metu.

$T = 2\pi\sqrt{LC}$ – Tomsono formulė – laisvojo elektrinio virpesio periodo priklausomybė nuo virpesių kontūro induktyvumo ir talpos.

$i = I_m \sin\omega t$ – srovės stiprio kitimo dėsnis laisvųjų ir priverstinių elektrinių virpesių metu.

$u = U_m \sin\omega t$ – įtampos kitimo dėsnis laisvųjų ir priverstinių elektrinių virpesių metu.

$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ – kintamosios elektros srovės stiprio efektinės vertės ryšys su amplitudine verte.

$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ – kintamosios įtampos efektinės vertės ryšys su amplitudine verte.

$X_C = \frac{1}{\omega C}$ – talpinės varžos kintamajai srovei priklausomybė nuo kondensatoriaus talpos ir srovės kitimo dažnio.

$X_L = \omega L$ – induktyviosios varžos kintamajai srovei priklausomybė nuo ritės induktyvumo ir srovės kitimo dažnio.

$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$ – transformatoriaus transformacijos koeficiento apibrėžimas bei jo ryšys su vijų pirminėje ir antrinėje ritėse skaičiais.

$v = \lambda f$ – bangų sklidimo greičio ryšys su bangos ilgiu ir svyravimo (kitimo) dažniu. Iš čia $\lambda = \frac{v}{f}$ – bangos ilgio priklausomybė nuo jos sklidimo greičio.

$\Delta d = k\lambda$ – interferencijos maksimumo sąlyga.

$\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ – interferencijos minimumo sąlyga.

$d \sin\varphi = k\lambda$ – difrakcinės gardelės interferencijos maksimumo sąlyga.

$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$ – šviesos lūžio dėsnis.

$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$ – bangų sklidimo greičių pirmoje ir antroje terpėse ryšys su santykiniu lūžio rodikliu toms terpėms.

$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ – plonojo lęšio formulė – lęšio laužiamosios gebos ir jo židinio nuotolio ryšys su daikto ir atvaizdo nuotoliais nuo lęšio. Iš čia $f = \frac{d \cdot F}{d - F}$ – susidariusio atvaizdo nuotolio nuo lęšio priklausomybė nuo daikto atstumo iki lęšio ir jo židinio nuotolio.

Modernioji fizika

$E = hf$ – fotono energijos ryšys su elektromagnetinio lauko kitimo dažniu.

$hf = A + \frac{mv^2}{2}$ – fotoefekto (Einšteino) lygtis – absorbuoto fotono energijos ryšys su elektrono išlaisvinimo darbu ir suteikta jam kinetine energija. Iš čia $\frac{mv^2}{2} = hf - A$ – fotoelektrono kinetinės energijos priklausomybė nuo elektromagnetinio lauko kitimo dažnio ir medžiagos rūšies.

$hf_{min} = A_{iš}$ – Einšteino lygtis fotoefekto raudonajai ribai.

$eU_S = \frac{mv^2}{2}$ – fotoelektroną stabdančio elektrinio lauko stabdymo įtampos ryšys su jo kinetine energija.

$E = mc^2$ – energijos ir masės ryšys.

$A = Z + N$ – atomo branduolio sandaros formulė.

$f = \frac{|E_k - E_n|}{h}$ – išspinduliuoto fotono elektromagnetinio lauko kitimo dažnio ryšys su to fotono energija.

$E_r = \Delta Mc^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_b)c^2$ – branduolio ryšio energijos priklausomybė nuo jį sudarančių protonų ir neutronų skaičiaus.

$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$ – radioaktyviojo skilimo dėsnis – nesuskilusių atomų skaičiaus priklausomybė nuo puskiekio periodo, pradinio nesuskilusių atomų skaičiaus ir radioaktyviojo spinduliavimo trukmės (laiko).

Literatūra

1. *Tarasonis V.* Fizika I–III dalys. V.: Žiburio leidykla, 1998.
2. *Kikoinas I., Kikoinas A.* Fizika. K.: Šviesa, 1992.
3. *Buchovcevas B., Klimontovičius J., Miakiševas G.* Fizika. K.: Šviesa, 1991.
4. *Miakiševas G., Buchovcevas B.* Fizika. K.: Šviesa, 1991.
5. *Straižys V.* Astronomija. Fizika. K.: Šviesa, 1993.

Serija „Į egzaminą – be baimės!“
Albinas Ivanauskas, Stasys Jurėnas
FIZIKA
Prisiminkime ir pakartokime

Brėžiniai *Vytautės Zovienės*
Redaktorė *Rozita Znamenskaitė*
Viršelis *Rūtos Deltuvaitės*

Tir. 4000 egz. Leid. Nr. 15 916. Užsak. Nr. 6.660.
Uždaroji akcinė bendrovė leidykla „Šviesa“, E. Ožeškienės g. 10, LT-44252 Kaunas.
El. p. mail@sviesa.lt
Interneto puslapis http://www.sviesa.lt
Spausdino AB spaustuvė „Spindulys“, Gedimino g. 10, LT-44318 Kaunas.
El. p. spaustuve@spindulys.lt
Interneto puslapis http://www.spindulys.lt
Sutartinė kaina